

FEP-Katalog für die VSG

- **Dokumentation**

Bericht zum Arbeitspaket 7

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Erstellt von:



FEP-Katalog für die VSG

- **Dokumentation** (CD-ROM)

Bericht zum Arbeitspaket 7

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Jens Wolf (GRS)
Joachim Behlau (BGR)
Thomas Beuth (GRS)
Guido Bracke (GRS)
Christiane Bube (KIT/INE)
Dieter Buhmann (GRS)
Christian Dresbach (BGR)
Jörg Hammer (BGR)
Siegfried Keller (BGR)
Bernhard Kienzler (KIT/INE)
Hans Klinge (BGR)
Jürgen Krone (DBE TEC)
Andree Lommerzheim (DBE TEC)
Volker Metz (KIT/INE)
Jörg Mönig (GRS)
Sabine Mrugalla (BGR)
Till Popp (IfG)
Andre Rübel (GRS)
Jan Richard Weber (BGR)

Juni 2012

Anmerkung:

Das FuE-Vorhaben UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

Ursprüngliche Zielsetzung

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnissstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

Aktualisierte Zielsetzung

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

Aktualisierte Projektplanung

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

Projektpartner

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

Arbeitspakete

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

Deskriptoren:

Datenbank, FEP, FEP-Katalog, Gorleben

Vorwort

Der vorliegende Bericht ist ein Auszug aus der FEP-Datenbank, die im Rahmen des Vorhabens VSG erstellt wurde. Stichtag des Auszuges war der 30.04.2012. Die Aufteilung der in der Datenbank hinterlegten Information erfolgt für jeden FEP in zwölf Unterkapiteln:

1. Definition/Kurzbeschreibung
2. Allgemeine Informationen und Beispiele
3. Sachlage am Standort
4. Standortspezifische Auswirkungen
5. Zeitliche Beschränkung
6. Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit
7. Wirkung in den Teilsystemen
8. Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren
9. Begründungen
10. Direkte Abhängigkeiten
11. Offene Fragen
12. Literaturquellen

Detaillierte Erläuterungen und Hintergrundinformationen zu den einzelnen Einträgen finden sich im Bericht zum Konzept und Aufbau dieses FEP-Kataloges.¹

¹ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau.. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-282, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, 2012.

Inhaltsverzeichnis

1	Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase (1.1.12.01)	1
2	Kokillensticking (1.1.12.02)	7
3	Neotektonische Vorgänge (1.2.01.01).....	11
4	Orogenese (1.2.01.02).....	16
5	Senkung der Erdkruste (1.2.01.03)	20
6	Hebung der Erdkruste (1.2.01.04).....	24
7	Krustendeformation (1.2.02.01)	28
8	Grabenbildung (1.2.02.02).....	33
9	Erdbeben (1.2.03.01).....	37
10	Magmatismus (1.2.04.01)	46
11	Gesteinsmetamorphose (1.2.05.01).....	50
12	Hydrothermale Aktivität (1.2.06.01).....	54
13	Erosion (1.2.07.01)	57
14	Sedimentation (1.2.07.02).....	63
15	Diagenese (1.2.08.01)	69
16	Diapirismus (1.2.09.01).....	76
17	Subrosion (1.2.09.02)	85
18	Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)	94

19	Transgression oder Regression (1.3.03.01)	103
20	Permafrost (1.3.04.01)	109
21	Bildung kryogener Klüfte (1.3.04.02)	118
22	Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)	124
23	Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)	132
24	Glaziale Rinnenbildung (1.3.05.03)	144
25	Meteoriteneinschlag (1.5.01.01)	155
26	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)	159
27	Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)	164
28	Inventar: Metalle (2.1.01.02)	170
29	Inventar: Organika (2.1.01.03)	181
30	Inventar: Sonstige Stoffe (2.1.01.04)	189
31	Abfallmatrix (2.1.02.01)	199
32	Brennelement-Behälter (2.1.03.01)	206
33	Sonstige Endlagerbehälter (2.1.03.02)	218
34	Versagen eines Brennelement-Behälters (2.1.03.03)	232
35	Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters (2.1.03.04)	240
36	Versatz (2.1.04.01)	247
37	Verschlussmaterial (2.1.05.01)	256
38	Schachtverschlüsse (2.1.05.02)	269
39	Streckenverschlüsse (2.1.05.03)	282

40	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.04)	294
41	Sonstige Verschlussbauwerke (2.1.05.05).....	304
42	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften (2.1.06.01)	313
43	Bohrlochverrohrung (2.1.06.02)	320
44	Ausfall einer Bohrlochverrohrung (2.1.06.03).....	328
45	Konvergenz (2.1.07.01)	335
46	Fluiddruck (2.1.07.02).....	344
47	Salzgruskompaktion (2.1.07.03)	352
48	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.04)	362
49	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses (2.1.07.05)	372
50	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses (2.1.07.06).....	383
51	Lageverschiebung des Schachtverschlusses (2.1.07.07).....	392
52	Ausfall eines Dichtpfropfens (2.1.07.08)	400
53	Porosität (2.1.08.01)	406
54	Permeabilität (2.1.08.02).....	414
55	Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)	423
56	Kanalisation im Salzgrus (2.1.08.04)	431
57	Kanalisation in Dichtelementen (2.1.08.05).....	437
58	Lösungszutritt ins Grubengebäude (2.1.08.06)	444
59	Strömungsvorgänge im Grubengebäude (2.1.08.07)	451

60	Quellen des Bentonits (2.1.08.08).....	460
61	Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)	469
62	Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)	480
63	Metallkorrosion (2.1.09.03)	489
64	Korrosion der Brennstoffmatrix (2.1.09.04)	499
65	Korrosion von Glas (2.1.09.05)	507
66	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen (2.1.09.06)....	513
67	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme (2.1.09.07)	524
68	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails (2.1.09.08)	532
69	Zersetzung von Organika (2.1.10.01).....	538
70	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock (2.1.10.02)	546
71	Wärmeproduktion (2.1.11.01)	553
72	Thermische Expansion oder Kontraktion (2.1.11.02)	560
73	Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)	568
74	Gasbildung (2.1.12.01)	573
75	Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02).....	579
76	Gaseindringdruck (2.1.12.03).....	584
77	Zündfähige Gasgemische (2.1.12.04)	589
78	Strahlungsinduzierte Aktivierung (2.1.13.01).....	594
79	Materialversprödung durch Strahlung (2.1.13.02)	599

80	Radiolyse (2.1.13.03).....	602
81	Kritikalität (2.1.14.01).....	612
82	Auflockerungszone (2.2.01.01)	616
83	Wirtsgestein (2.2.02.01).....	627
84	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein (2.2.02.02).....	636
85	Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01).....	643
86	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge (2.2.04.01)	649
87	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)	656
88	Selbstversatz (2.2.06.02).....	667
89	Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)	670
90	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.02).....	678
91	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge (2.2.07.03).....	689
92	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge (2.2.07.04)	698
93	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge (2.2.08.01)	703
94	Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge (2.2.09.01).....	711
95	Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges (2.2.10.01)..	715
96	Thermomigration (2.2.10.02)	720
97	Thermische Carnallitzersetzung (2.2.10.03).....	726
98	Schmelzen des Salzgesteins (2.2.10.04)	732

99	Thermochemische Sulfatreduktion (2.2.10.05).....	736
100	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein (2.2.11.01)	744
101	Topografie (2.3.01.01)	755
102	Oberflächengewässer (2.3.04.01).....	762
103	Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01).....	767
104	Radionuklidmobilisierung (3.2.01.01).....	774
105	Sorption und Desorption (3.2.03.01)	783
106	Kolloide (3.2.04.01).....	791
107	Komplexbildung (3.2.05.01)	798
108	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase (3.2.07.01)	805
109	Advektion (3.2.07.02).....	812
110	Mechanische Dispersion (3.2.07.03).....	817
111	Diffusion (3.2.07.04)	822
112	Matrixdiffusion (3.2.07.05)	828
113	Sonstige Transportprozesse (3.2.07.06)	833
114	Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern (3.2.08.01)	837
115	Radionuklidtransport in der Gasphase (3.2.09.01)	844

1 Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase (1.1.12.01)

1.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses FEP umfasst unvorhergesehene, nicht bewusst herbeigeführte, sicherheitsrelevante Ereignisse in der Betriebsphase, die in der Nachverschlussphase Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben können.

1.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase, wie z. B. Schachtunfälle und Unfälle bei der Einlagerung in Strecken und Bohrlöchern, könnten auch Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben. Die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen dieser Ereignisse werden durch technische und organisatorische Vorsorgemaßnahmen minimiert. Gleichwohl ist ihr Auftreten nicht völlig auszuschließen. Die möglichen Auswirkungen sowie die Beherrschung dieser Auswirkungen werden im Zuge eines Genehmigungsverfahrens in einer Störfallanalyse gezeigt. Die Störfallanalyse basiert auf einer systematischen Analyse aller betrieblichen Abläufe sowie der Erfassung und Bewertung aller Störungen, die dabei möglicherweise auftreten könnten. Ergeben sich durch die Störfälle sicherheitsrelevante Konsequenzen, so wird untersucht, wie entweder die Störfälle vermieden werden können oder wie die Auswirkungen soweit minimiert werden können, dass sie gemäß Regelwerk akzeptabel sind. Insofern wird in einem iterativen Prozess das Endlagerkonzept und die Endlagerkomponenten gemäß den Ergebnissen der Störfallanalyse so lange optimiert bis auch bei Betriebsstörungen alle gesetzlichen Anforderungen erfüllt werden.

So wurde im Rahmen einer Störfallanalyse für das geplante Endlager Konrad nachgewiesen, dass durch die entsprechende Auslegung der Schachtförderanlage die Ereignisse

- Absturz der Abfallgebinde bei der Beschickung des Förderkorbes,
- Absturz von Abfallgebinden bei der Förderung nach unter Tage,
- Absturz schwerer Lasten auf Abfallgebinde im Förderkorb und
- thermische Einwirkungen auf Abfallgebinde infolge anlageninternem Brand

der Klasse 2 (Ereignisse, die durch Auslegungsmaßnahmen an der Anlage bzw. den Abfallgebinden vermieden werden) im Sinne der Störfall-Leitlinie (BMI 1983, SSK 1983) zuzuordnen sind. Dies entspricht in der "Internationalen Bewertungsskala der kerntechnischen Ereignisse (INES)" der Klasse 2 (Störfälle mit begrenzten radiologischen Konsequenzen). Die entsprechenden technischen Vorsorgemaßnahmen umfassen u. a.:

- Verriegelungen des Förderkorbs,
- Achtseilförderanlage,
- Arretierung des Plateauwagens im Förderkorb und
- Auslegung der Bremsen (SELDA-Anlage).

Gemäß den Ergebnissen der Störfallanalyse beträgt die Eintrittswahrscheinlichkeit des Absturzes des Förderkorbes $1E-6$ oder niedriger und ist somit dem Restrisiko zuzuordnen (BfS 2002).

Weitere wichtige EVI (Einwirkungen von Innen)-Ereignisse, die im Zuge einer Störfallanalyse zu bewerten sind, sind thermische Lastfälle (Brand übertage und untertage) und mechanische Lastfälle (Gebindeabsturz und Kollision von Transportmitteln). Dabei sind bei untertägigen Ereignissen auch Auswirkungen auf die Grubenräume und das angrenzende Gebirge zu betrachten und bezüglich ihrer langzeitsicherheitlichen Relevanz zu bewerten. Falls sich Konsequenzen für die Langzeitsicherheit während der Nachverschlussphase des Endlagers ergeben könnten, so sind die Auswirkungen durch bergbautechnische Maßnahmen zu vermeiden bzw. zu begrenzen.

Ähnlich wie der Schachtförderkorbabsturz wird die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Killenabsturzes in ein Einlagerungsbohrloch durch technische und organisatorische Vorsorgemaßnahmen (z. B. Auslegung des technischen Equipments nach KTA, Qualitätssicherung, betriebliche Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen) soweit minimiert, dass es in den Restrisikobereich fällt. Weitere Störfälle sind bei der Einlagerung der Gebinde nicht zu betrachten, weil keine Hub- und Transportprozesse durchgeführt werden, die in den Störfallanalysen nicht schon berücksichtigt worden sind und somit keine Einwirkungen auf die Behälter auftreten können, für die sie nicht ausgelegt worden sind.

Eine Entscheidung, das Endlager zum Ende der Betriebsphase nicht in der vorgesehenen Weise zu verschließen, wird hier nicht betrachtet.

1.3 Sachlage am Standort

Die betrieblichen Planungen für ein Endlager am Standort Gorleben befinden sich noch in einem sehr frühen Konzeptstadium. Daher kann zurzeit auch noch keine Störfallanalyse durchgeführt und Störfälle identifiziert werden, die für die Langzeitsicherheit relevant wären. Im Folgenden wird deshalb ganz allgemein das zukünftige Vorgehen bei der Vermeidung von Störfällen bzw. bei der Minimierung ihrer Konsequenzen dargestellt.

In einem iterativen Prozess werden die Auswirkungen möglicher Störfälle und die Wirksamkeit der Gegen- bzw. Vorsorgemaßnahmen in einem möglichen Endlager am Standort Gorleben im Zuge einer Störfallanalyse analysiert und demonstriert. Dabei wird begründet, dass alle zu betrachtenden Störfälle berücksichtigt wurden. Durch technische und organisatorische Maßnahmen (Auslegung des technischen Equipments, Qualitätssicherung, betriebliche Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen, betriebliche Regelungen etc.) werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Auswirkungen derartiger Ereignisse in der Betriebsphase minimiert (Bollingerfehr et al. 2011, Peiffer & McStocker 2012), so dass sie sicherheitstechnisch nicht relevant sind bzw. durch geeignete Maßnahmen beseitigt werden können, oder die Eintrittswahrscheinlichkeit so gering ist, dass sie dem Restrisiko zugeordnet werden können.

Trotz technischer und organisatorischer Vorsorgemaßnahmen sind unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase nicht völlig auszuschließen. Außerdem könnten während des Endlagerbetriebs unerwartete Ereignisse auftreten, die in der Störfallanalyse nicht berücksichtigt wurden und sicherheitsrelevante Konsequenzen haben. Falls derartige Ereignisse aber auftreten, so wird durch geeignete Maßnahmen während der Betriebsphase sichergestellt, dass sie keine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben werden. Die anforderungsgerechte Beseitigung möglicher lokaler Integritätsverletzungen des Wirtsgesteins in sicherheitsrelevanten Bereichen wird beim späteren Betrieb des Endlagers durch Sachverständige der Behörde überprüft.

Falls die Konsequenzen eines Störfalles nicht beseitigt werden können, so besteht die Möglichkeit z. B. defekte Gebinde zurückzuholen bzw. Gebinde aus Strecken oder

Bohrlöchern in ungünstigen Gebirgsbereichen zu entfernen und diese Einlagerungsbereiche dann abzuwerfen.

1.4 Standortspezifische Auswirkungen

Entweder sind die Auswirkungen der unplanmäßigen Ereignisse in der Betriebsphase aufgrund technischer Maßnahmen vernachlässigbar oder ihre Eintrittswahrscheinlichkeit ist aufgrund von Vorsorgemaßnahmen so gering, dass sie dem Restrisiko zugeordnet werden können und daraus resultierende Endlagerentwicklungen unwahrscheinlich sind. Die entsprechenden Nachweise sind im Rahmen des Genehmigungsverfahrens in der Störfallanalyse zu erbringen.

Falls es im späteren Betrieb zu Störfällen kommt, so ist der Aufsichtsbehörde nachzuweisen, dass die Auswirkungen des Störfalles entweder nicht sicherheitsrelevant sind oder dass sie in anforderungsgerechter Weise beseitigt wurden.

1.5 Zeitliche Beschränkung

Das FEP selbst ist auf den Zeitraum bis zum Verschluss des Endlagers beschränkt. Durch Vorsorgemaßnahmen ist sichergestellt, dass sich keine relevanten Auswirkungen auf die Nachverschlussphase ergeben.

1.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [X] nicht zu betrachten

1.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

1.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

1.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeiten: Trotz technischer und organisatorischer Vorsorgemaßnahmen sind unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase nicht völlig auszuschließen. Falls derartige Ereignisse aber auftreten, so muss durch geeignete Maßnahmen während der Betriebsphase sichergestellt werden, dass sie keine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben werden. Die anforderungsgerechte Beseitigung möglicher lokaler Integritätsverletzungen des Wirtsgesteins in sicherheitsrelevanten Bereichen wird beim Betrieb des Endlagers durch Sachverständige der Behörde überprüft. Daher sind die Auswirkungen dieser Ereignisse für den Langzeitsicherheitsnachweis hier nicht zu betrachten.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Im Genehmigungsverfahren ist im Zuge einer Störfallanalyse nachzuweisen, dass derartige Ereignisse keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit des Endlagers haben.

Wirkung in den Teilsystemen: Da das FEP nicht zu betrachten ist, ist es auch bei der Wirkung in allen vier Teilsystemen nicht zu berücksichtigen.

1.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

1.11 Offene Fragen

Keine.

1.12 Literaturquellen

BfS (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter. - Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter.

BMI (1983): "Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gegen Störfälle i. S. d. § 28 Abs. 3 StrlSchV" (Störfall-Leitlinien) vom 18. Oktober 1983 (BAnz. 1983, Nr. 245a)

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum AP 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln

Chernykh, M., Graf., R., Filbert, W. (2011): Kritikalitätssicherheit von CASTOR® - Behältern während der Endlagerung. - Jahrestagung Kerntechnik, 17.-19. Mai 2011; Berlin.

Peiffer, F., McStocker, B (2012): Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten. Bericht zum Arbeitspaket 12, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-279, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

SSK (1983): Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien des BMI zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäß § 28 Abs. 3 StrlSchV. Verabschiedet in der 47. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 14./15. Juli 1983 und der 187. Sitzung der Reaktor-Sicherheitskommission am 22. Juni 1983. Bundesanzeiger Nr. 245a vom 31. Dezember 1983 und Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 1.

2 Kokillensticking (1.1.12.02)

2.1 Definition/Kurzbeschreibung

Kokillensticking bezeichnet das Verkanten einer Kokille beim Absenken ins Einlagerungsbohrloch vor Erreichen der Einlagerungsteufe, so dass die bestimmungsgemäße Einlagerungsposition nicht erreicht wird und die Kokille nicht mehr aus dem Bohrloch entfernt werden kann.

2.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Durch Verkanten beim Absenken in einem Einlagerungsbohrloch erreicht die Kokille nicht die vorgesehene Einlagerungsposition. Daher wird auf die weitere Einlagerung von Kokillen in das Bohrloch verzichtet und das Bohrloch nach Verfüllen der Hohlräume mit Versatzmaterial abgeworfen. Da ein Kokillensticking vor allem bei Unebenheiten in der Bohrlochwandung auftreten kann, besteht das Risiko vor allem bei unverrohrten Bohrlöchern in plastisch deformierbaren Gesteinen (Ton, Salz) oder an Trennflächen (Klüfte, Störungen) in Hartgesteinen (Granit).

Mögliche Auswirkungen des Kokillenstickings schließen bei der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle Änderungen im Temperaturfeld ein, da das blockierte Bohrloch weniger Kokillen enthält und entweder in ein anderes (nur teilbefülltes) Bohrloch mehr Kokillen eingelagert werden oder ein komplett neues Einlagerungsbohrloch erforderlich ist.

2.3 Sachlage am Standort

Aufgrund regulatorischer Anforderungen an eine Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente während der Betriebsphase sowie eine Handhabbarkeit der Abfallgebinde während der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase (BMU 2010) ist für das Bohrlochkonzept eine Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2012). Mögliche Ursachen für Kokillensticking in verrohrten Bohrlöchern (Unebene Bohrlochwand an den Verbindungsstellen der Verrohrungsabschnitte, Deformation der Bohrlochverrohrung, Pendeln der Kokille im Bohrloch) werden durch Qualitätssicherungsmaßnahmen beim Einbau der Bohrlochverroh-

rung (Kontrolle der Bohrlochverrohrung) und bei der Einlagerung der Kokillen sowie durch entsprechende technische Maßnahmen (Distanzhalter für Kokillen) vermieden.

2.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Kokillenstickings ist aufgrund der unter "Sachlage" beschriebenen Vorsorgemaßnahmen so gering, dass sie dem Restrisiko zugeordnet werden kann und daraus resultierende Endlagerentwicklungen unwahrscheinlich sind. Die entsprechenden Nachweise sind im Rahmen des Genehmigungsverfahrens in der Störfallanalyse zu erbringen.

2.5 Zeitliche Beschränkung

Das FEP ist auf den Zeitraum bis zum Verschluss des Endlagers beschränkt, mögliche Auswirkungen betreffen die Nachverschlussphase. Durch Vorsorgemaßnahmen ist sichergestellt, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Kokillenstickings sehr gering ist und dem Restrisiko zugeordnet werden kann.

2.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

2.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

2.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

2.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeiten: Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Kokillenstickings ist aufgrund von Vorsorgemaßnahmen, u. a. durch die technische Ausgestaltung des Einlagerungskonzeptes (inkl. Verrohrung), so gering, dass es dem Restrisiko zugeordnet werden kann und daraus resultierende Endlagerentwicklungen unwahrscheinlich sind. Die entsprechenden Nachweise werden im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens in der Störfallanalyse erbracht.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Da das FEP nicht zu betrachten ist, ergeben sich auch keine negativen Auswirkungen auf die Funktion der Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Da das FEP nicht zu betrachten ist, ist es auch bei der Wirkung in allen vier Teilsystemen nicht zu berücksichtigen.

2.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

2.11 Offene Fragen

Keine.

2.12 Literaturquellen

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum AP 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

3 Neotektonische Vorgänge (1.2.01.01)

3.1 Definition/Kurzbeschreibung

Neotektonische Vorgänge sind Bewegungen der Erdkruste, die im gegenwärtig herrschenden tektonischen Regime Deformationsstrukturen erzeugen und damit den derzeit vorherrschenden Spannungszustand einer Region charakterisieren.

3.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der Begriff Neotektonik wurde 1937 von Obrutschew definiert. Er verstand darunter die Deformationen der Erdkruste, die in der letzten Hälfte des Quartärs stattgefunden haben. Von anderen Wissenschaftlern wird der Begriff für Deformationsprozesse verwendet, die den Zeitabschnitt Neogen bis Gegenwart umfassen. Auf welchen Zeitraum sich der Begriff „Neotektonik“ bezieht, wird bislang sehr unterschiedlich gehandhabt. Eine neotektonische Deformation kann Folge einer länger andauernden, älteren großtektonischen Bewegung sein. Da der Beginn der großtektonischen Bewegungen variieren kann, ist es nicht möglich, den Zeitraum neotektonischer Deformationen genauer zu definieren, da der Gesamtzeitraum den Rahmen der Neotektonik überschreiten kann.

Junge Krustenbewegungen und Seismizität nehmen in Mitteleuropa mit zunehmender Entfernung vom Alpenrand ab. Der Spannungsabbau konzentriert sich auf das, in einem starren Grundgebirge vorgezeichnete Bruchgitter (Ziegler 1990). In abweichender Weise hat das Niedersachsen-Tektogen (Boigk 1968) auf das alpidische Spannungsfeld reagiert. Hier ist das variszische Grundgebirge kleinschollig zerstückelt. Das mesozoische Deckgebirge wird durch mächtige oberpermische Evaporite abgetrennt, welche ein eigenständiges Reagieren der tektonischen Stockwerke im Hangenden und Liegenden der Salzfolge ermöglichen.

Ungefähr zeitgleich mit der alpidischen Kompressionsphase kam es im Niedersachsen-Tektogen zu Bruchbildungen, Faltungen, Überschiebungen, Grabenbildungen und Blattverschiebungen. Die geringe quartäre Tektonik in diesem Gebiet reichte aus, um den Rest alpidischer Spannungen weitestgehend abzubauen. Im Spannungsfeld wirksame Zug- und Scherspannungen können das Deck- und Nebengebirge tektonisch beeinflussen. Die dabei entstehenden bzw. reaktivierten Störungssysteme sind in der Lage, die lokalen Durchlässigkeiten der Sedimente bzw. Sedimentgesteine entlang der

Störungsflächen zu erhöhen. Die an neotektonische Vorgänge möglicherweise gebundene Verstellung von Grundwasser-hemmenden Schichten vermag die Fließrichtungen im Deck- und Nebengebirge zu verändern und je nach den strukturellen Gegebenheiten die Durchlässigkeiten der Aquifere insgesamt zu erhöhen oder zu erniedrigen.

Störungen werden in den FEP Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge und Störungen und Störungszonen im Wirtsgestein behandelt.

3.3 Sachlage am Standort

Das regionale Spannungsfeld im norddeutschen Tiefland wird u. a. von Grünthal & Stromeyer (2001) beschrieben. Am Standort Gorleben existieren, den regional-tektonischen Verhältnissen des nördlichen Mitteleuropas entsprechend, keine extremen Spannungen, die zu vergleichbaren Beanspruchungen der Kruste führen, wie sie aus dem alpinen Raum bekannt sind. Grabenbildungen wie die des Oberrheintalgrabens oder Gebirgsbildungen wie die Heraushebung und die Überschiebung der Alpen während der alpinen Orogenese bzw. die Heraushebung des Harzes im Lias kamen in Norddeutschland während der letzten 10 Millionen Jahre nicht vor. Eine zukünftig hochaktive und mobile Kruste lässt sich daher für die norddeutsche Tiefebene aus den in den letzten 10 Millionen Jahren abgelaufenen Vorgängen nicht ableiten. Das großräumige Spannungsregime im Bereich des nördlichen Mitteleuropas wird sich auf Grund der bestehenden plattentektonischen Situation in geologischen Zeiträumen nur langsam ändern. Deshalb ist davon auszugehen, dass sich die zukünftigen, tektonisch bedingten Auswirkungen in einem ähnlichen Rahmen abspielen, wie sie in den Veränderungen der letzten 10 Millionen Jahre nachzuweisen sind (vgl. hierzu auch Baldschuhn et al. 2001).

3.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Die derzeitige geringe neotektonische Dynamik reicht für die Anlage neuer, geologischer Strukturen, welche die geologischen Standortgegebenheiten signifikant verändern würden, nicht aus.

Störungen werden in den FEP Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge und Störungen und Klüfte im Wirtsgestein behandelt.

3.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Die derzeitig vorherrschenden Spannungsverhältnisse sind über einen Zeitraum von ca. 10 Millionen Jahren angelegt worden. Die für die Ausbildung neuer tektonischer Spannungsverhältnisse und Strukturen benötigten Zeiträume liegen unter Zugrundelegung der aktuellen plattentektonischen Situation am Standort Gorleben über dem vorgeschriebenen Nachweiszeitraum von einer Million Jahren.

3.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

3.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

3.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

3.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Für den Standort Gorleben wird angenommen, dass die Fortsetzung neotektonischer Vorgänge im Rahmen der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit als "wahrscheinlich" gegeben ist, aber aufgrund der geringen Ausprägung keine wesentlichen Auswirkungen auf die unmittelbare Region des Standortes hat.

Wirkung in den Teilsystemen: Der Prozess läuft kontinuierlich ab, ist aber als „nicht zu betrachten“ einzustufen, da die mit neotektonischen Vorgängen verbundenen Auswir-

kungen im Nachweiszeitraum, analog zu denen der letzten Million Jahre für den Standort Gorleben als gering eingeschätzt werden.

Einwirkungen auf Initial-Barrieren: Es wird angenommen, dass die Fortsetzung neotektonischer Vorgänge keine wesentlichen Auswirkungen auf die unmittelbare Region des Standortes hat.

3.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

3.11 Offene Fragen

Keine.

3.12 Literaturquellen

Bankwitz, P. (1971): Geologische Auswertung von geodätisch ermittelten Krustenbewegungen im Gebiet der DDR. - Petermanns geogr. Mitt., 115: 130-140; Leipzig.

Frischbutter, A. (2001): Recent vertical movements (map 4). (In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.C., Schwab, G., Stackebrandt, W. (Hrsg.) (2001): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 27-31; Kleinmachnow.

Grünthal, G., Stromeyer, D. (2001): Direction of recent maximal stress and epicenter map of tectonic earthquakes (maps 5 and 6). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (Hrsg.) (2001): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 33-37; Kleinmachnow.

Ludwig, Meyer, W., Stets, J. (1998): Junge Tektonik im Rheinischen Schiefergebirge und ihre Quantifizierung. - Z. dt. geol. Ges., 149/3: 359-379; Hannover.

Günther, R. (1977): Großfotolineationen des mitteleuropäischen Raumes und ihre geologisch-tektonische Bedeutung. - Geotekt. Forsch., 53: 42-67.

Larsson, S. Ä., Tullborg, E.-L. (1993): Tectonic regimes in the Baltic Shield during the last 1200 Ma - A review. - SKB, Technical Report 94-05: 75 S; Stockholm.

Lempp, C., Lerche, I. (2006): Correlation of stress directions across the Northern German Basin: suprasalt and subsalt differences. - Z. dt. Ges. Geowiss., 157, 2: 279-298.

Ludwig, A. O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 5-12; Kleinmachnow.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72; Hannover.

Palmer, J., Groß, U. (1999): Richtung der rezenten, horizontalen Hauptspannung im Subsalinar Nordostdeutschlands. - Z. geol. Wiss., 27, 3/4: 189-200; Berlin.

Reicherter, K., Kaiser, A., Stackebrandt, W. (2005): The post-glacial landscape evolution of the North German Basin: morphology, neotectonics and crustal deformation. - Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), 94: 1083-1093; Berlin.

Stackebrandt, W. (2004): Zur Neotektonik in Norddeutschland - Zeitschrift für geologische Wissenschaften 32: 84-95.

4 Orogenese (1.2.01.02)

4.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Orogenese wird die Gesamtheit aller Prozesse verstanden, die zur Bildung eines Gebirges (Orogen) beitragen.

4.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Orogene entstehen, wenn sich bewegende Kontinentalplatten kollidieren, die Platten durch den Bewegungsvorgang übereinander gleiten und eine der Platten subduziert wird. Die Gebirge bestehen somit im Wesentlichen aus den Gesteinen der beteiligten Krustenplatten. In Mitteleuropa sind Gesteine der kaledonischen, variszischen und alpidischen Orogenese vorhanden.

Die Silur- und Devon-zeitlichen Gesteine der kaledonischen Orogenese sind im tiefen Untergrund Norddeutschlands nachweisbar. Südlich davon schließen sich die Gesteine des variszischen Gebirges an, die z. T. an der Oberfläche sichtbar sind (z. B. Harz und Rheinisches Schiefergebirge).

Zeitlich wird die variszische Orogenese dem ausgehenden Paläozoikum zugeordnet. Sie wurde durch die Kollision von Gondwana und Laurasia verursacht. Die alpidische Orogenese fand in der jüngsten Erdgeschichte Europas statt und resultierte aus dem Zusammenstoß der europäischen und afrikanischen Krustenplatte. Sie umfasst in etwa den Zeitraum der letzten 100 Millionen Jahre, wobei es zur stärksten Hebung der Alpen im Miozän vor etwa 20 bis 5 Millionen Jahre kam. Wie die heutigen Bewegungen von Teilen der Alpen zeigen, ist die Orogenese noch nicht abgeschlossen. Ihr Ausmaß ist verglichen mit den miozänen Aktivitäten aber deutlich zurück gegangen.

Insgesamt liegen in Europa Kettengebirge vor, die von Nord nach Süd immer jünger werden.

4.3 Sachlage am Standort

Die augenblicklichen, für Norddeutschland maßgeblichen Spannungszustände weisen seit dem Abklingen der alpidischen Orogenese in Mitteleuropa keine Werte auf, die auf

eine beginnende Entwicklung eines Orogens hindeuten. Dieses und die Lage des Standortes fernab von Plattengrenzen machen eine Orogenese im Bereich des zu betrachtenden Standortgebietes innerhalb der nächsten Million Jahre und darüber hinaus unwahrscheinlich.

4.4 Standortspezifische Auswirkungen

Keine.

4.5 Zeitliche Beschränkung

Die vollständige Entwicklung eines Orogens aufgrund der Kollision von Krustenplatten benötigt eine beträchtliche Zeit. Änderungen im Aufbau der Gesteinsabfolgen ergeben sich daher erst im Laufe von Millionen von Jahren.

4.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

4.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

4.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

4.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Aufgrund der geologischen Gesamtsituation (z. B. großer Abstand zu den Plattengrenzen) ist am Standort Gorleben eine Orogenese ausgeschlossen.

Wirkung in den Teilsystemen: Eine Behandlung der Teilsysteme erfolgt auf Grund des Vorstehenden nicht.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Keine Beeinträchtigungen der Funktion der Initial-Barrieren. Abhängigkeiten werden deshalb nicht ausgewiesen.

4.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

4.11 Offene Fragen

Keine.

4.12 Literaturquellen

Weiterführende Literatur:

Frischbutter, A. (2001): Recent vertical movements (map 4). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 27-31; Kleinmachnow.

Illies, H., Greiner, G. (1976): Regionales stress-Feld und Neotektonik in Mitteleuropa. - Oberrhein, geol. Abh., Jg. 25, 1/2: 1-40; Karlsruhe.

Lempp, C., Lerche, I. (2006): Correlation of stress directions across the Northern German Basin: suprasalt and subsalt differences. - Z. dt. Ges. Geowiss., 157, 2: 279-298; Stuttgart.

Ludwig, A. O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 5-12; Kleinmachnow.

Murawski, H. (1982): Deutsches Handwörterbuch der Tektonik. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1. - 9. Lieferung; Hannover.

Palmer, J., Groß, U. (1999): Richtung der rezenten, horizontalen Hauptspannung im Subsalinar Nordostdeutschlands. - Z. geol. Wiss., 27, 3/4: 189-200.

Reicherter, K., Kaiser, A., Stackebrandt, W. (2005): The post-glacial landscape evolution of the North German Basin: morphology, neotectonics and crustal deformation. - Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), 94: 1083-1093.

Ziegler, P. A. (1990): Collision related intra-plate compression deformations in western and central Europe. (In: Logatchev, N. A. & Zwart, H. J. (eds.): Intracontinental Mountainous Terranes). - J. Geodynamics, Spec. Iss., Vol. 11, No. 4: 357-388.

Internet (29.09.2010): <http://www.geodsz.com/deu/d/Orogenese>.

5 Senkung der Erdkruste (1.2.01.03)

5.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Senkung der Erdkruste ist eine Form von Epirogenese und bezeichnet eine über lange geologische Zeiträume andauernde, weitspannige Abwärtsbewegung, bei der die Gesteinsabfolge nicht durch spannungsabbauende Tektonik gestört wird.

5.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die laterale Ausdehnung von epirogenetisch verursachten Einsenkungen (oder Aufwölbungen) der Erdkruste beträgt zwischen einigen zehn bis zu mehreren tausend Kilometern (Lexikon der Geowissenschaften 2000). Senkungen der Erdkruste haben in der Regel marine Transgressionen und die Ablagerung von Sedimenten in den sich bildenden Meeresbecken zur Folge. Die Mächtigkeit der Sedimente ist u. a. von der Absenkungsgeschwindigkeit der Erdkruste abhängig.

5.3 Sachlage am Standort

Die heutige Erdoberfläche des Gebietes am Standort Gorleben liegt überwiegend höher als 15 m ü. NN (Gorleben-Schächte: 26 m, Höhbeck: 76 m, Gartow: 17 m; vgl. Klinge et al. 2007:15). Die Senkung der Erdkruste beträgt seit dem Oligozän (Rupel, d. h. seit etwa 30 Mio. Jahren) im Mittel ca. 0,01 mm/Jahr (vgl. Ludwig 2001, Ludwig & Schwab 1995), was 10 m pro 1 Mio. Jahre entspricht. Eine Überflutung des Standorts Gorleben allein aufgrund einer Senkung der Erdkruste ist daher auszuschließen.

5.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die erwartete epirogenetische Absenkung im Nachweiszeitraum ist mit 10 m sehr gering, so dass Auswirkungen wie z. B. Erhöhung der Deckgebirgsmächtigkeit oder Änderungen der Temperatur- und Druckverhältnisse im Deckgebirge oder im Wirtsgestein nicht zu erwarten sind.

Wesentliche Umgestaltungen des Standortes Gorleben durch das FEP und die davon ausgehenden Auswirkungen sind erst in sehr ferner geologischer Zukunft (>10.000.000 Jahre) zu erwarten (s. a. Kockel 2002).

5.5 Zeitliche Beschränkung

Kontinuierlicher, lang andauernder Prozess in der Größenordnung von bis zu mehreren zehner Millionen Jahren.

5.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

5.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

5.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

5.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Absinken der Erdkruste ist am Standort Gorleben im zu betrachtenden Nachweiszeitraum wahrscheinlich, aber nur gering ausgeprägt.

Wirkung in den Teilsystemen: Eine Auswirkung auf die Teilsysteme ist wegen der geringen Ausprägung des FEP nicht gegeben.

Einwirkung auf Initial-Barrieren: Für die nächste Million Jahre ergeben sich aus der geringen Wirksamkeit des FEP keine Auswirkungen auf die Funktion der Initial-Barrieren.

5.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

5.11 Offene Fragen

Keine.

5.12 Literaturquellen

Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71: 147 S.; Hannover.

Kockel, F. (2002): Rifting processes in NW-Germany and the German North Sea Sector. - Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw, 81 (2): 149-158.

Lexikon der Geowissenschaften (2000): Bd. Edu - Insti. - Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 2: 506 S.; Berlin.

Ludwig, A. O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 5-12; Kleinmachnow.

Ludwig, A. O., Schwab, G. (1995): Neogeodynamica Baltica - ein internationales Kartenprojekt (IGCP-Projekt Nr. 346). Deutsche Beiträge zur Charakterisierung der vertikalen Bewegungen seit Beginn des Rupelian (Unteroligozän) bzw. seit Ende der Holstein-Zeit. - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 2.2: 47-57; Kleinmachnow.

6 Hebung der Erdkruste (1.2.01.04)

6.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Hebung der Erdkruste ist eine Form von Epirogenese und bezeichnet eine über lange geologische Zeiträume andauernde, weitspannige Aufwärtsbewegung, bei der die Gesteine der oberen Erdkruste nicht durch spannungsabbauende Tektonik gestört werden.

6.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die laterale Ausdehnung von epirogenetisch verursachten Aufwölbungen oder Einsenkungen der Erdkruste beträgt zwischen einigen zehner bis zu mehreren tausend Kilometern (Lexikon der Geowissenschaften 2000). Ein typisches Beispiel für derartige Prozesse ist die, mit einer Geschwindigkeit von ca. 10 mm/Jahr ablaufende Aufwärtsbewegung des skandinavischen Schildes. Isostatische Hebungen, die nach dem Abtauen von mächtigem Inlandeis als Ausgleichsbewegungen der Erdkruste ablaufen und denen entsprechende Absenkungen durch die Eisauflast vorangegangen sind, werden im FEP Krustendeformation diskutiert.

6.3 Sachlage am Standort

Für den Standort Gorleben wurde für die letzten 30 Millionen Jahre ein genereller Trend der Abwärtsbewegung von 0,01 mm/Jahr nachgewiesen, der auch in der Zukunft weiter anhalten wird. Daher ist nicht damit zu rechnen, dass die Hebung der Erdkruste in der nächsten eine Million Jahren von Bedeutung sein wird. Außerdem treten die Auswirkungen der Epirogenese im Vergleich zu anderen auf das Deckgebirge einwirkenden Prozessen insgesamt in den Hintergrund, so dass dieser Prozess für die geologische Entwicklung dieses Bereichs unbedeutend ist (Mrugalla 2011).

6.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Keine.

6.5 Zeitliche Beschränkung

Kontinuierlicher, lang andauernder Prozess in der Größenordnung von bis zu mehreren zehner Millionen Jahren (z. B. Gerardi & Wildenborg 1999: 81 und Van Den Berg 1994).

6.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

6.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

6.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

6.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Aufgrund der seit ca. 30 Mio. Jahre andauernden Subsidenz ist davon auszugehen, dass sich der Standort Gorleben auch im Nachweiszeitraum mit einer Geschwindigkeit von 0,01 mm/Jahr absenken wird. Nennenswerte Hebungstendenzen werden ausgeschlossen. Deshalb wird die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieses FEP als „nicht zu betrachten“ eingeschätzt.

Wirkung auf die Teilsysteme: Da das FEP nicht zu betrachten ist, gibt es keine Wirkung auf die Teilsysteme.

Einwirkungen auf Initial-Barrieren: Für die nächste Million Jahre ergeben sich aus der fehlenden Wirksamkeit des FEP keine Auswirkungen auf die Funktion der Initial-Barrieren.

6.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

6.11 Offene Fragen

Keine.

6.12 Literaturquellen

Gerardi, J., Wildenborg, A.B.F. (1999): Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. - BGR, Ber., 117869; Hannover.

Jaritz, W. (1995): The history of the Gorleben site as a basis for predicting the long-term behaviour of a barrier system. (In: Beaudoin, B., Godefroy, P., Mouroux, B. (eds.): Actes du Colloque GEOPROSPECTIVE, 18-19 april 1994). - UNESCO: 393-408; Paris.

Keller, S. (1990): Das Ablaugungsverhalten der Salzstöcke in NW-Deutschland (Abschl.-Ber. des BMFT-Förderungsvorhabens KWA 5801 9 'Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock', Teilprojekt III). - BGR, Ber., 106570; Hannover.

Lexikon der Geowissenschaften (2000). - Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 2; Berlin.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Van Den Berg, M. (1994): Neo-tectonics of the Roer Valley rift system. Style and rate of crustal deformation inferred from syntectonic sedimentation. - Geol. en Mijnbouw, Vol. 73: 143-156; Amsterdam.

7 Krustendeformation (1.2.02.01)

7.1 Definition/Kurzbeschreibung

Verformung der Erdkruste, die nicht tektonisch bedingt ist, sondern als isostatische Ausgleichsbewegung im Zuge einer Vergletscherung auftritt.

7.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Durch exogene oder endogene Kräfte kann die Erdkruste deformiert werden. Während die Deformationen, die durch Mantelprozesse bewirkt werden (Epirogenese), als langsame großräumige und über Millionen von Jahren dauerhafte Hebungen und Senkungen verlaufen (siehe FEP Hebung der Erdkruste, Senkung der Erdkruste), kommt die hier angesprochene Krustendeformation aufgrund einer Inlandgletscherauflast kurzzeitig zustande. Nach dem Abschmelzen des Inlandeisgletschers und der Beseitigung der Auflast bildet sich die Deformation ebenso rasch zurück. Die isostatischen Ausgleichsbewegungen seit der letzten Kaltzeit sind relativ weit fortgeschritten, aber noch heute in Skandinavien messbar.

In Abhängigkeit von den Eismächtigkeiten wird durch das Gletschergewicht (Eis und Sedimentfracht) die Erdkruste abgesenkt. Bei einer vermuteten Eismächtigkeit von ca. 2.000 – 3.000 m in Skandinavien wird für die dortige Erdkruste ein Deformationsbetrag von ca. 700 m bis 1.000 m angenommen. Im Vorfeld des Gletschers kann es in Abhängigkeit vom Krustenaufbau zu einer Aufwölbung kommen. Der Wiederaufstieg der Kruste bzw. das Absinken im ehemaligen Gletschervorfeld, sofern eine isostatische Reaktion stattfindet, muss um diese Deformationsbeträge entsprechend erfolgen.

Hebungen würden generell zu einer Erosion der Erdoberfläche und damit zu einer Reduzierung der Deckgebirgsmächtigkeit führen. Bei einer auf Senkung beruhenden Deformation der Erdkruste müsste es zur großräumigen Überflutung des Geländes und zur Ablagerung von neuen Sedimenten über dem bestehenden Deckgebirge kommen. Die Verlagerungen der Ostseeküste nach Ende der letzten Kaltzeit stellen ein Beispiel für Veränderungen dar, die sich u. a. auf isostatische Ausgleichsbewegungen zurückführen lassen.

7.3 Sachlage am Standort

Das Inlandeis der letzten Kaltzeit (Weichsel) erreichte den Standort Gorleben nicht. Heute ablaufende isostatische Ausgleichsbewegungen sind am Standort nicht nachgewiesen bzw. lassen sich von sonstigen, aufgrund anderer Ursachen wie Diagenese, Epirogenese und Erosion bedingten Höhenveränderungen der Erdoberfläche nicht unterscheiden.

Eisbedingte Krustenbewegungen während der älteren Kaltzeiten (Elster- u. Saale-Kaltzeit) sind am Standort und in seiner unmittelbaren Umgebung ebenfalls noch nicht nachgewiesen worden, was auf geringere Gletschermächtigkeiten als die in Skandinavien angenommenen zurückgeführt werden kann.

Möglicherweise ergibt sich aus der Verteilung mariner holsteinzeitlicher Sedimente (vgl. Map 3, Ludwig 2001) analog zu den Ostsee-Küstenverlagerungen nach Rückgang des Weichsel-Gletschers ein vager Hinweis auf Krustendeformationen im norddeutschen Raum. Die Holstein-Vorkommen würden danach auf jene Gebiete beschränkt sein, die ehemals durch die Auflast großer elsterzeitlicher Eismächtigkeiten abgesenkt waren. Ludwig (2001) sieht die Verteilung der Holstein-Vorkommen allerdings eher durch die Bewegungen innerhalb der „Central European Subsidence Zone“ beeinflusst.

7.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Es sind keine Auswirkungen am Standort aus der Vergangenheit bekannt. Falls es Krustenabsenkungen und -hebungen aufgrund der Gletscherauflast gegeben haben sollte, dürften die Auswirkungen wesentlich geringer gewesen sein als in Skandinavien, da die maximalen Eismächtigkeiten in der norddeutschen Tiefebene nur einige hundert Meter betragen haben, im Bereich des Standortes von etwa 700 bis 1.500 m erreicht haben könnten (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung, Feldmann 2002). Für die Zukunft wird mit ähnlichen Verhältnissen gerechnet, wie sie aus entsprechenden der Vergangenheit abgeleitet werden.

Verschiedentlich wird eine Initiierung des Salzaufstiegs durch die Inlandeisauflast diskutiert. Geologische Befunde sind hierfür nicht vorhanden, zumal eine Steilstellung z. B. von elsterzeitlichen Randsenkensedimenten aufgrund eines durch die Saale-Kaltzeit verursachten Salzaufstiegs nicht nachgewiesen wurde. Auch die geringe Dau-

er einer Eisüberlagerung dürfte eher für einen nur minimalen Einfluss auf das Aufstiegsverhalten eines Salzstocks sprechen (vgl. a. FEP Vollständige Inlandvereisung).

7.5 Zeitliche Beschränkung

Die durch Eiszeiten bewirkten Spannungsveränderungen verlaufen kurzfristiger als z. B. eine epirogenetisch bedingte Krustendeformation. Während die endogen bewirkten Krustendeformationen langsam mit langer Prozessdauer von mehreren Millionen Jahre ablaufen, kann sich die Wirkung der Eisauflast innerhalb des Beobachtungszeitraums von einer Million Jahre unter Berücksichtigung der Quartärgeschichte und Überlegungen zur zukünftigen klimatischen Entwicklung (Geradi & Wildenborg 1999, Loutre & Berger 2000, Ruddiman 2001) mindestens einmal, wenn nicht mehrmals in Abhängigkeit von der Entfernung zum Gletscherherkunftsgebiet und der Gletschermächtigkeit entfalten.

7.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

7.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

7.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

7.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Kaltzeitlich bedingte Krustendeformationen sind wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Wegen der am Standort nur geringen Gletschermächtigkeiten im Vergleich zu Skandinavien (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung) lassen sich die Deformationsbeträge während vergangener Kaltzeiten auch auf Grund der sonstigen kaltzeitlich bedingten Auswirkungen geologisch nicht nachweisen. Da für die Zukunft vergleichbare Kaltzeiten vom Ausmaß der vergangenen zu erwarten sind, werden am Standort keine relevanten Krustendeformationen zu erwarten sein. Eine Berücksichtigung des FEP für die Endlagerteilsysteme erfolgt deshalb nicht.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Beeinträchtigungen der Initial-Barrieren werden als nicht zutreffend eingestuft und die Nennung von Abhängigkeiten entfällt.

7.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

7.11 Offene Fragen

Keine.

7.12 Literaturquellen

Feldmann, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. - Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: X + 149 S.; Clausthal-Zellerfeld.

Gerardi, J., Wildenborg, A.B.F. (1999): Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. - BGR, Ber., 117869; Hannover.

Ludwig, A.O. (2001): Die heutige Höhenlage der Oberfläche mariner und limnischer holsteininterglazialer Sedimente und saaleglazialer Flussterrassen (Karte 3). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 21-25; Kleinmachnow.

Loutre, M.-F., Berger, A. (2000): Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacial ? - Climatic Change, 46: 61-90.

Ruddiman, W.F. (2001): Earth's climate: Past and Future. - W. H. Freeman and Company, 1. Auflage; New York/USA.

Weiterführende Literatur:

Sirocko, F., Reicherter, K., Lehne, R., Hübscher, C., Winsemann, J., Stackebrandt, W. (2008): Glaciation, salt and the present landscape. (In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins. The Central European Basin System). - Springer, 1. Auflage: 233-245; Heidelberg.

8 Grabenbildung (1.2.02.02)

8.1 Definition/Kurzbeschreibung

Grabenbildung (Taphrogenese) ist ein tektonischer Vorgang, der seine Ursachen in konvektiven Strömungen im Erdmantel hat.

8.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Aus dem Erdmantel aufsteigendes Magma bewirkt aufgrund der sich ändernden Druck- und Temperaturbedingungen innerhalb einer darüber liegenden kontinentalen Erdkruste Dehnungsvorgänge. Dabei entstehen meist langgestreckte Störungssysteme, und es bilden sich Gräben oder Grabenzonen. Das Einsinken der zentralen Grabenteile bei gleichzeitiger Heraushebung der Grabenrandbereiche (Schultern) wird durch die Sedimentation mächtiger grob- und feinklastischer Abtragungsprodukte, z. T. aber auch von Evaporiten begleitet. Die tief reichenden Störungen ermöglichen einen Magmatismus. Extreme Grabenbildung führt im weiteren Verlauf zur Aufspaltung der kontinentalen Krustenplatten und in diesem Zusammenhang zur Entstehung eines neuen Ozeanbodens. Merkmale der Gräben sind eine hohe Seismizität, aufdringendes Mantelmaterial, ein hoher Wärmefluss, alkalischer Magmatismus sowie eine negative Bouguer-Schwereanomalie.

Mit der Entwicklung eines Grabens und seiner Störungssysteme erfolgt eine Änderung der Geländemorphologie und damit verbunden die Abflussrichtung von Oberflächen- und Grundwasser. Größere Magmendecken oder Vulkane tragen ebenfalls zur Umgestaltung der Morphologie bei.

Beispiele für Gräben sind der Rheingraben mit dem Kaiserstuhl als ein ehemaliger Vulkan (Schreiber 1997) am Grabenrand und das Ostafrikanische Grabensystem, das genetisch mit der Abspaltung von Teilen Ostafrikas in Verbindung steht. Die Einsenkung des oberen Rheintalgrabens begann schon vor etwa 45 Millionen Jahre in der Mittel-Eozän-Zeit. Auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und von ihren Randbereichen sind weiterhin die Niederrheinische Bucht, die Hessische Senke, das Leinetal und der Bereich des Eger-Gebietes als Grabenstrukturen bekannt. Seismische Aktivitäten im Zusammenhang mit einem Graben sind heute im Wesentlichen auf die Nieder-

rheinische Bucht, den oberen Teil des Rheingrabens und den Eger-Graben beschränkt.

8.3 Sachlage am Standort

Am Standort Gorleben sind bislang keine tiefgreifenden aktiven Störungen festgestellt (Zirngast et al. 2004) oder andere Hinweise auf einsetzende Grabenbildung beobachtet worden. Die seit Ende Miozän herrschenden Spannungszustände (vgl. FEP Neotektonische Vorgänge) fördern nicht die Entstehung eines Grabensystems (z. B. Zang & Stephansson 2010). Eine Grabenbildung ist damit am Standort nicht zu erwarten.

8.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Keine.

8.5 Zeitliche Beschränkung

Eine Grabenbildung findet im Nachweiszeitraum am Standort nicht statt. Kontinuierlicher, lang andauernder Prozess in der Größenordnung von bis zu mehreren zehner Millionen Jahren (z. B. Gerardi & Wildenborg 1999: 81 und Van Den Berg 1994).

8.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [X] nicht zu betrachten

8.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

8.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

8.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Aus der geologischen Gesamtsituation ergeben sich am Standort Gorleben keine Hinweise für eine verstärkte Tektonik, die zu einer Grabenbildung mit hoher Seismizität oder einem Magmatismus im Nachweiszeitraum führen könnten. Das FEP ist für den Standort Gorleben nicht zu betrachten.

Wirkung in den Teilsystemen: Keine.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Nicht zu behandeln bzw. auszuweisen (s. o.).

8.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

8.11 Offene Fragen

Keine

8.12 Literaturquellen

Schreiber, U. (1997): Die Entwicklung eines konjugierten Schersystems mit Blockrotation, Grabenbildung und Vulkanismus zwischen Alpen und Nordatlantik im Känozoikum. (In: Büchel, G. (Hrsg.): Regionale Geologie von Mitteleuropa). - Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft (DGG), 2: S. 103; Hannover.

Zang, A., Stephansson, O. (2010): Stress Field of the Earth's Crust. - 1. Aufl.: 322 S., 1 DVD-Rom; Heidelberg (Springer).

Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht. - BGR, Ber.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72: 201 S.; Hannover.

9 Erdbeben (1.2.03.01)

9.1 Definition/Kurzbeschreibung

Durch großräumige tektonische Bewegungen können sich Spannungen innerhalb der Erdkruste aufbauen. Wird die Scherfestigkeit der Gesteine überschritten, kommt es zum Bruch. Dabei entladen sich die aufgestauten Spannungen in ruckartigen Bewegungen des Gesteins mit bleibenden Verschiebungen. Die freigesetzte Spannungsenergie erzeugt Erschütterungen, die sich vom Erdbebenherd aus als seismische Wellen ausbreiten. Neben tektonisch verursachten Erdbeben gibt es vulkanisch, isostatisch und vom Menschen ausgelöste Beben.

9.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Für die Bewertung von Erdbebenintensitäten wird die MSK-Skala benutzt. Intensität 6 bis 7 entspricht leichten Gebäudeschäden, bei 9 bis 10 stürzen Gebäude ein. Die MSK-Skala ist nicht direkt mit der Magnitude von Erdbeben vergleichbar.

Auf tektonische Erdbeben zurückzuführende Schäden werden aus Kohlebergwerken beschrieben. Die im Vergleich zu Schäden an übertägigen Anlagen vernachlässigbar geringen untertägigen Auswirkungen werden damit begründet, dass die Abstrahldämpfung für vollständig eingebettete Bauwerke wesentlich größer ist als für Hochbauten an der Erdoberfläche (vgl. Alheid & Hinzen 1988).

Erdbeben stehen häufig im Zusammenhang mit vulkanischer Aktivität. Solche Beben entstehen durch den Aufstieg von Magmen und sind im Allgemeinen schwächer als tektonische Beben. Eine weitere Ursache für Erdbeben können isostatische Ausgleichsbewegungen der Erdkruste sein, die infolge von abtauenden, mächtigen Inlandeis Massen insbesondere im Bereich aktiver Störungszonen zur plötzlichen Freisetzung von Deformationsenergie beitragen.

Vom Menschen hervorgerufene Erdbeben können durch Bergbautätigkeit, bei der Förderung von Erdöl oder Erdgas und durch Einpressen von Flüssigkeiten in tiefe Bohrlöcher induziert werden. In Bergbaugebieten können sich Scherbrüche, ausgelöst von Spannungsumlagerungen in der Nähe von Hohlräumen, als Erdbeben bemerkbar machen. Der Zusammenbruch von nicht versetzten Hohlräumen unter Tage hat in den Ka-

liabbaugebieten von Mittel- und Ostdeutschland zu weithin spürbaren Einsturzbeben geführt, u. a. bei Sünna am 23.6.1975, bei Völkershausen am 13.3.1989 und bei Halle am 11.9.1996.

Minkley et al. (2010) untersuchten die Auswirkungen dynamischer Ereignisse, wie sie durch Erdbeben induziert werden, am „Naturanalogon“ Gebirgsschläge im Kalibergbau. Über geomechanische Modellrechnungen, verbunden mit einer Demonstration der daraus resultierenden Barrierenbelastungen sowie direkten Messungen in der durch den Gebirgsschlag beanspruchten hangenden Steinsalzbarriere in der Grube Teutschenthal wurde nachgewiesen, dass durch das Gebirgsschlagereignis die Barrierenintegrität nicht verletzt wurde. Als Konsequenz folgern Minkley et al. (2010), dass „... die stärksten bergbauinduzierten dynamischen Beanspruchungen, welche die aus natürlicher Seismizität in Deutschland möglichen Belastungen um ein Vielfaches übertreffen und im Vergleich mit statischen Beanspruchungen weitaus kritischere deviatorische Belastungsfälle für die geologischen Barrieren darstellen, ab einer bestimmten Mächtigkeit der Salinarbarrieren nicht mehr im Stande sind, deren Integrität und Dichtheit zu verletzen.“

9.3 Sachlage am Standort

Erdbeben kommen nicht gleichmäßig verteilt vor, sondern konzentrieren sich auf bestimmte, durch Besonderheiten im geologischen Bau oder in ihrer geologischen Entwicklung charakterisierte Gebiete. Für die Bundesrepublik Deutschland wurde eine erdbebengeographische Einteilung vorgenommen (Leydecker 1986, Leydecker & Aichele 1998, Leydecker 2011). Die einzelnen Gebiete sind dabei aufgrund der im Zeitraum 800 bis 2008 beobachteten Seismizität, der geologischen Entwicklung und der gegenwärtigen tektonischen Verhältnisse voneinander abgegrenzt worden. Nach der in Leydecker (2011) vorgenommenen Regionalisierung befindet sich der Standort Gorleben in der Region Altmark, für die im Betrachtungszeitraum lediglich drei Erdbeben der Intensität 5,5 bis 6,5 MSK festgestellt wurden. Dies verdeutlicht, dass stärkere Erdbeben im seismisch ruhigen Gebiet um Gorleben sehr selten sind. Der Intensitätswert bezieht sich auf Wirkungen eines Erdbebens an der Erdoberfläche. Deshalb sind die zu erwartenden Schäden an der Oberfläche nicht auf ein Bergwerk übertragbar (ein verfülltes Bergwerk würde sehr viel geringere Schäden aufweisen als ein Bauwerk an der Erdoberfläche).

Einsturzbeben stellen generell seltene Ereignisse dar (Leydecker 1980), die auf die klassischen Bergbaugebiete (z. B. Ruhrgebiet, Saarland, Mitteldeutsches Kalirevier) beschränkt sind und mit Besonderheiten in der Abbauführung sowie in der Verfüllung der bergmännischen Hohlräume erklärt werden können. Vulkanische Beben kommen am Standort Gorleben und in seiner weiteren Umgebung nicht vor.

Ahorner (1989) kommt unter Zugrundelegung der damals gültigen KTA 2201 (1975) nach der Auswertung historischer Erdbeben im Bereich des Norddeutschen Beckens (im Umkreis von 200 km um Gorleben) zu dem Schluss, dass „der Standort Gorleben ein Umfeld mit einer sogar für mitteleuropäische Verhältnisse sehr geringen Seismizität aufweist“. Steinwachs (1996) bestätigt diese Ergebnisse unter Anwendung der neueren KTA 2201.1 (1990).

Bei der Auslegungsplanung von kerntechnischen Anlagen wurde gemäß KTA 2201.1 (1990) gefordert, ein Bemessungserdbeben als Grundlage der seismischen Lastvorgaben zu bestimmen. Die Festlegung des Bemessungserdbebens für den Standort Gorleben erfolgte bei Ahorner (1989) restriktiver als für „normale“ kerntechnische Anlagen auf der Grundlage deterministischer Ansätze. Laut KTA 2201.1 wird keine Eintrittswahrscheinlichkeit mehr angegeben, sondern ein Bemessungserdbeben betrachtet (Steinwachs 1996). Das nachfolgend charakterisierte Bemessungserdbeben deckt nach Ahorner (1989) und Steinwachs (1996) sowohl alle tektonischen Erdbeben als auch die natürlichen Einsturzbeben im Standortbereich ab:

Makroseismische Standortintensität = 7,3 MSK-Skala

Standortbeschleunigung, horizontal = $1,4 \text{ m/s}^2$

Standortbeschleunigung, vertikal = $0,7 \text{ m/s}^2$

Starkbebendauer, Untertagestandort = 3,0 s

Starkbebendauer, Übertagestandort = 7,0 s

Eine Prognose der Erdbebenhäufigkeit und -intensität für die nächste 1 Million Jahre auf der Grundlage der in Ahorner (1989) vorgenommenen Analyse der Erdbebenstatistik der letzten 2.000 Jahre ist mit großen Ungewissheiten verbunden. Darüber hinaus ist die Ermittlung der im Betrachtungszeitraum zu erwartenden Erdbeben durch Multiplikation des Betrachtungszeitraumes mit der Eintrittswahrscheinlichkeit nicht korrekt. Die Anzahl der erwarteten Erdbeben kann nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angegeben werden. Hierzu wäre dann eine Poisson-Verteilung zu verwenden. Deren Kalibrierung an Beobachtungen der letzten 2.000 Jahre wäre aber nur zulässig, wenn

im Betrachtungszeitraum Veränderungen der Erdbeben-auslösenden Bedingungen (Spannungszustände, tektonische Bewegungen etc.) ausgeschlossen werden können. Zielführender ist daher ein deterministischer Ansatz nach KTA 2201 Teil 1, wie in Leydecker et al. (2006) dargestellt. In erster Näherung könnten für Gorleben die Angaben zu den AKW-Standorten Grohnde und Krümmel angesetzt werden (siehe Leydecker et al. 2008).

Die von der BGR und der Universität Karlsruhe durchgeführten Untersuchungen zur Strukturgeologie Nordwestdeutschlands (Gruppe BGR, Brückner-Röhling et al. 2002) bzw. zu Modellrechnungen zur Klärung horizontaler Hauptspannungsrichtungen für Norddeutschland und damit auch für den Bereich Gorleben (Gruppe Uni Karlsruhe, Connolly et al. 2003) belegen, dass Erdbeben, ausgelöst durch eine Wiederbelebung von Sockelstörungen unwahrscheinlich sind.

9.4 Standortspezifische Auswirkungen

Es sind keine Auswirkungen von Erdbeben auf Salzstöcke bekannt. So wird im Anforderungskatalog "Wasserwirtschaftliche Anforderungen an Gesteinskavernen zum Lagern wassergefährdender Stoffe" des BMU (1989) im Abschnitt 'Geodynamische Risiken' die Feststellung getroffen, dass tektonische Bewegungen im Salzkörper wegen der Plastizität des Salzes unter den herrschenden petrostatischen Drücken keine relevanten Konsequenzen zur Folge haben (vgl. auch Minkley et al. 2010).

Unter Anwendung der KTA wurde ein Bemessungserdbeben von 7,3 MSK abgeleitet, die Strecken- und Schachtverschlüsse werden gegen ein solches Erdbeben ausgelegt. Ein solches Erdbeben vermag in der Konturzone von offenen Grubenbauten Schäden anzurichten. Nach den bislang vorliegenden Planungen zum Verschluss der Schächte und Versatz des Infrastrukturbereiches ist vorgesehen, abschnittsweise Schotter einzubringen. Durch die Erschütterungen in Folge von Erdbeben könnte der Schotter zusätzlich verdichtet werden. Dies würde eine Sackung des Materials nach sich ziehen, die aufgrund der Betonwiderlager keinen direkten Einfluss auf die Dichtelemente hat.

9.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

9.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

9.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

9.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt [], nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“, „Streckenverschlüsse“, „Wirtsgestein“.

9.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Erdbeben sind für den langen Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre auch am Standort Gorleben oder in seiner Umgebung wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Aus der geologischen Gesamtsituation ergeben sich keine Hinweise auf ein erhöhtes Erdbebenaufkommen, das Auswirkungen auf ein verschlossenes und verfülltes Endlager haben könnte. Auswirkungen starker Erdbeben auf Salzstöcke sind unbekannt bzw. wurden anhand von geologischen Merkmalen bisher nicht nachgewiesen. Dennoch werden Erdbeben berücksichtigt, um die Auswirkungen stärkerer Erdbeben auf das Endlagersystem zu prüfen. Auswirkungen auf bestimmte Komponenten der Schachtverschlüsse sind möglich, so dass das Teilsystem Strecken und Schächte zu berücksichtigen ist. Ein Erdbeben von 7,3 MSK hat keine nennenswerten Auswirkungen auf das Deck- und Nebengebirge.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Beeinträchtigungen auf die Funktion der Initial-Barriere Schachtverschluss sind durch die Auswirkungen von Erdbeben auf die in den Verschlussystemen verbauten Schottersäulen möglich.

9.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Bemerkungen:

Abhängigkeiten zu kaltzeitlichen Vorgängen werden nicht aufgeführt, da z. B. eine Inlandvereisung erst nach Ablauf der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlussbauwerke zu erwarten ist.

Resultierende FEP:

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Durch Erdbeben werden Spannungsakkumulationen abgebaut und im Untergrund verlagert.

Beeinflusste FEP:

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Sonstige Verschlussbauwerke

Bohrlochverrohrung

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Wirtsgestein

Begründungen:

Streckenverschlüsse, Schachtverschlüsse: Seismisch bedingte Erschütterungen der Erdkruste können zur Bildung von Rissen in Verschlussmaterialien führen.

Sonstige Verschlussbauwerke: Seismisch bedingte Erschütterungen der Erdkruste können zur Bildung von Rissen in Verschlussmaterialien führen.

Bohrlochverrohrung: Es ist zu prüfen, ob sich Erdbeben, auf die Bohrlochverrohrung auswirken können.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: Seismisch bedingte Erschütterungen der Erdkruste können zur Setzung von Verschlussmaterialien führen.

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: Seismisch bedingte Erschütterungen der Erdkruste können zur Bildung von Rissen in Verschlussmaterialien führen.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Seismisch bedingte Erschütterungen der Erdkruste können zur Setzung von Verschlussmaterialien führen.

Ausfall eines Dichtpfropfens: Seismisch bedingte Erschütterungen der Erdkruste können zur Bildung von Rissen in Verschlussmaterialien führen.

Wirtsgestein: Die Auswirkungen eines Erdbebens von 7,3 MSK sind auch für das Wirtsgestein zu betrachten.

Bemerkungen:

Topographie: Ein Erdbeben von 7,3 MSK hat keine nennenswerten Auswirkungen auf die Topographie.

9.11 Offene Fragen

Die heute gültige Regel KTA 2201.1 stammt aus dem Jahre 1990. In den letzten fünf Jahren wurde diese Regel überarbeitet, es gibt einen Vorabdruck vom November 2010. Die Endfassung liegt noch nicht vor. Sich daraus ergebende Änderungen in den

Regelwerken sind im Rahmen nachfolgender Sicherheitsbewertungen zu berücksichtigen.

9.12 Literaturquellen

Ahorner, L. (1989): Seismologisches Gutachten Gorleben. - Geologisches Institut der Universität zu Köln. Im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig. 178 S., Köln.

Alheid, H.-J., Hinzen, K.-G. (1988): Response of underground openings to earthquake and blasting loading. (In: Swoboda, G. (Ed.): Numerical Methods in Geomechanics). - Proc. 6th. Intern. Conf. of Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, 11.-15. April 1988), Balkema: 1689-1696; Rotterdam.

BMU (1989): Wasserwirtschaftliche Anforderungen an Gesteinskavernen zum Lagern wassergefährdender Stoffe (Anforderungskatalog). - Bek. d. Bundesminister f. Umwelt, Naturschutz u. Reaktorsicherheit v. 1.4.1989 - WA I 3 - 523 074/27, GMBI 1989, Nr. 16.

Brückner-Rohling, S., Espig, M., Fischer, M., Fleig, S., Forsbach, H., Kockel, F., Krull, P., Stiewe, H., Wirth, H. (2002): Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung -Teil 1: Strukturgeologie . - BGR, Ber.: 253 S.; Hannover.

Connolly, P., Gölke, M., Bäßler, H., Fleckenstein, P., Hettel, S., Lindenfeld, M., Schindler, A., Theune, U., Wenzel, F. (2003): Finite Elemente Modellrechnungen zur Erklärung der Auffächerung der größeren horizontalen Hauptspannungsrichtung in Norddeutschland. - Univers. Karlsruhe, Inst. f. Geophysik, Ber.: 163 S.; Karlsruhe.

Leydecker, G. (1980): Stellungnahmen zu den Thesen von E. GRIMMEL. 3. Erdbeben in Nord-Deutschland. - Z. dt. geol. Ges., 131: 547-555; Hannover.

Leydecker, G. (1986): Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000-1981. - Geol. Jb., E 36: 3-83, 7 Abb., 2 Tab., 39 Zitate, Hannover.

Leydecker, G., Aichele, H. (1998): The Seismogeographical Regionalisation of Germany: The Prime Example for Third-Level Regionalisation. - Geol. Jb., E 55: 85-98; Hannover.

Leydecker, G., Schmitt, T., H. Busche (2006): Erstellung ingenieurseismologischer Gutachten für Standorte mit erhöhtem Sekundärrisiko auf der Basis des Regelwerks KTA 2201.1 - Leitfaden - . - 58 S., 16 Abb., 4 Tab., 2 Anh., ISBN 3-510-95952-3; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. Vertrieb: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Leydecker, G., Schmitt, T., Busche, H., Schaefer, T. (2008): Seismo-engineering parameters for sites of interim storages for spent nuclear fuel at German nuclear power plants. - Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28: 754-762; Amsterdam.

Leydecker, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 2008. - Geol. Jb., E 59; 198 S., 12 Abb., 5 Tab., 9 Anlagen, 1 CD; BGR Hannover / Germany; Vertrieb: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. BMBF-Projekt FKZ 02C1264. - Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG): 214 S.; Leipzig.

Steinwachs, M. (1996): Stellungnahme zu dem „Seismologischen Gutachten Gorleben“, erstellt von der Abteilung Erdbebengeologie des Geologischen Intituts der Universität zu Köln. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung; Hannover.

10 Magmatismus (1.2.04.01)

10.1 Definition/Kurzbeschreibung

Magmatismus kommt im Zusammenhang mit gebirgsbildenden Prozessen und entlang von Plattengrenzen der Kruste sowie innerhalb von Rift- oder tief reichenden Störungszonen vor. Dabei werden Magmen, Dämpfe und Gase entweder bis zur Erdoberfläche gefördert oder verbleiben aufgrund unzureichender Transportenergie oder strukturgeologischer Gegebenheiten in unterschiedlichen Tiefen der Erdkruste. Es wird zwischen Extrusiva (Vulkanismus) und Intrusiva (Plutonismus) unterschieden.

10.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Im Zusammenhang mit den plattentektonischen Ereignissen des Tertiärs (Grabenbildungen, Alpenfaltung, Öffnung des Atlantiks) fanden in Deutschland bis zum Ausgang der letzten Eiszeit Vulkanausbrüche statt. Die nördlichsten deutschen und zu Gorleben nächstgelegenen Gebiete mit größeren Vulkanit-Vorkommen liegen in Südniedersachsen und Hessen. Diese vulkanischen Aktivitäten sind im geologischen Sinne relativ jung. So z. B. wurde die Einstufung der Basalt-Intrusion von Rolfsbüttel-Wendeburg mit jünger als Paläozän (65 bis 55 Mio. Jahre) vorgenommen. Die hessischen Basaltvorkommen, wie Vogelsberg und Rhön werden ins Miozän (vor etwa 14 Mio. Jahren) eingestuft (Stork & Gerardi 1987). Intrusiva besitzen folglich in Nordwestdeutschland mindestens ein jungtertiäres Alter und sind im Zusammenhang mit der alpidischen Gebirgsbildung zu sehen. Ein weiteres Auftreten ist daher hier in nächster geologischer Zukunft bis zu einer Million Jahre unwahrscheinlich.

An Magmatismus gebundene CO₂-Austritte oder Thermalquellen spielen im Rahmen dieser Betrachtungen keine Rolle.

10.3 Sachlage am Standort

Intrusiver Magmatismus hat nur untergeordnete Auswirkungen auf die Oberflächenmorphologie und damit auf die hydrogeologischen Standortverhältnisse. Lediglich die Platznahme eines größeren Magmakörpers in Oberflächennähe vermag durch Aufwölbung des Hangenden zu einer geringen morphologischen Veränderung führen.

Vulkanische Aktivitäten unmittelbar am Standort könnten das Grundwassersystem im Umfeld umformen. Dann wären neugebildete Störungszonen im Deck- und Nebengebirge denkbar. Ereignisse in größerer Entfernung von z. B. > 200 km werden keine Auswirkungen haben.

Ein Aufleben des im Tertiär abgelaufenen alpidischen Magmatismus mit Bildung von Vulkanschloten und einer Magmenförderung bis zur Oberfläche ist im Gebiet des Standortes unwahrscheinlich. Eine Reaktivierung vulkanischer Tätigkeit ist in Deutschland für die im Langzeitsicherheitsnachweis zu betrachtende Zukunft lediglich in der Eifel und im Vogtland zu erwarten. Beide Gebiete sind vom Standort genügend weit entfernt, so dass durch diesen Magmatismus eine Beeinflussung ausgeschlossen werden kann.

Der Magmatismus wäre an tief reichende seismisch aktive Schwächezonen in der Erdkruste gebunden. Solche Zonen sind aus dem Nahbereich um Gorleben nicht bekannt. Das in der Literatur (Hoffmann et al. 1996, Rabbel et al. 1995) zitierte und aufgrund seismischer Untersuchungen und Schwereanomalien abgeleitete herzynisch verlaufende, paläozoische Elbe-Lineament zeigt im Raum um den Standort keine nachweisbare Beeinflussung jüngerer mesozoischer oder känozoischer Schichten. Deshalb kann auch für die nächste 1 Mio. Jahre ein aktives tektonisches Geschehen entlang des Lineamentes ausgeschlossen werden.

10.4 Standortspezifische Auswirkungen

Keine. Die Voraussetzungen für eine Platznahme größerer magmatischer Körper und ihre Freilegung innerhalb der nächsten eine Million Jahre sind für die Verhältnisse am Standort Gorleben nicht gegeben, so dass eine Umgestaltung der Morphologie und der hydrologischen Bedingungen durch Intrusiva nicht erwartet wird.

10.5 Zeitliche Beschränkung

Ausgehend von der regionalgeologischen Position des Standortes Gorleben wird Magmatismus am Standort und in seiner Nähe nicht erwartet.

10.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

10.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

10.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

10.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Aufgrund der geologischen Gesamtsituation ist am Standort kein Magmatismus im Nachweiszeitraum zu erwarten. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird deshalb als „nicht zu betrachten“ eingestuft. Wirkung in den Teilsystemen: Eine Intrusion von Magmen findet am Endlagerstandort nicht statt. Auswirkungen auf das Endlagersystem sind deshalb nicht zu betrachten und müssen bei der Endlagerauslegung nicht berücksichtigt werden.

Beeinträchtigung der Initial-Barrieren: Die Einwirkungen auf die Initial-Barrieren werden daher als nicht zutreffend eingestuft. Die Nennung von Abhängigkeiten entfällt.

10.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

10.11 Offene Fragen

Keine.

10.12 Literaturquellen

Embleton, C., King, A.M.C. (1975): Glacial Geomorphology. - 1. Aufl.: 573 S.; London (Edw. Arnold).

Hoffmann, N., Stieve, H., Pasternak, G. (1996): Struktur und Genese der Mohorovicic-Diskontinuität (Moho) im Norddeutschen Becken - ein Ergebnis langzeitregistrierter Steilwinkelseismik. - Z. angew. Geol., 42 (2): 138-148; Hannover.

Rabbel, W., Förster, K., Schulze, A., Bittner, R., Röhl, J., Reichert, J.C. (1995): A high-velocity layer in the lower crust of the North German Basin. - Terra Nova, 7 (3): 327-337; Oxford/U.K.

Stork, G.-H., Gerardi, J. (1987): Geophysikalische Messungen und Bohrungen bei Rolfsbüttel-Wendeburg. - BGR, Ber., 99936: 16 S.; Hannover.

11 Gesteinsmetamorphose (1.2.05.01)

11.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Gesteinsmetamorphose versteht man die Umwandlung von Gefüge und mineralogisch-geochemischer Zusammensetzung eines bereits vorhandenen Festgesteins unter geänderten Temperatur- und Druckbedingungen. Bei der Metamorphose kommt es unter veränderten physikalischen Bedingungen zu Mineralreaktionen, d. h. zu Um- und Neubildung von Mineralen unter teilweiser Beteiligung von fluiden Phasen.

11.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Oberflächennahe diagenetische Prozesse oder die Verwitterung fallen nicht unter den Begriff Gesteinsmetamorphose. Die Grenze zwischen Metamorphose und Diagenese ist durch das Vorkommen von Mineralvergesellschaftungen definiert, die nicht im sedimentären Bereich entstehen können (Winkler 1967). Metamorphe Prozesse führen in Abhängigkeit von den p-T-Bedingungen zu Gefügeumwandlungen, wie z. B. Einregelungen und orientiertes Wachstum neuer Minerale oder Entstehung von Schieferungen. Lösungen spielen bei der Metamorphose eine wesentliche Rolle, u. a. auch Freisetzung von Kristallwasser. Im Gegensatz zu Silikatgesteinen kommt es bei Evaporiten schon bei wesentlich geringeren Temperatur- und Druckerhöhungen zu Mineralumbildungen sowie Gefügeveränderungen (Braitsch 1962). Es wird zwischen prograder und retrograder Metamorphose unterschieden. Prograde Metamorphose ist an ein Absinken des Gesteins in tiefere Erdkrustenbereiche bzw. eine zunehmende Überdeckung der Gesteine gebunden (Erhöhung von p und T). Eventuell noch vorhandene Gesteinsporositäten werden bei der prograden Metamorphose reduziert. Retrograde Metamorphose erfordert eine, an tektonische Prozesse gebundene Verfrachtung von bereits regionalmetamorph überprägten Gesteinen in höhere Krustenbereiche mit geringeren p- und T-Bedingungen.

11.3 Sachlage am Standort

Eine Regionalmetamorphose von Gesteinen findet bei höheren Temperaturen und Drücken (T größer 200°C ; p meist größer 200 MPa), z. B. nach Absenkung der Gesteinsschichten in mehrere km Tiefe statt (z. B. Epirogenese). Für derartige Druck- und

Temperaturbedingungen ist bei Ausschluss von signifikanten, bruchtektonisch verursachten Absenkungen am Standort die Ablagerung von mehreren tausend Meter mächtigen Sedimenten in einem sich schnell absenkenden Meeresbecken erforderlich. Weder die für eine solche Absenkung benötigte Zeit (für 1.000 bis 1.500 m Deckgebirge vor dem Aufstieg des Salzstocks Gorleben waren ca. 40 bis 60 Mio. Jahre erforderlich, was den Nachweiszeitraum deutlich überschreitet) noch das geotektonische Regime (großräumige Absenkung) dafür sind vorhanden.

Eine Metamorphose der Salzgesteine (siehe FEP Thermische Carnallitzersetzung) durch eine zeitweilige Temperaturerhöhung wird durch eine entsprechende Endlagerplanung vermieden. Kontaktmetamorphe Prozesse im Umfeld von magmatischen Intrusionen oder vulkanischen Gängen mit Auswirkungen auf die Barriereigenschaften des Salzes oder des Deck- und Nebengebirges finden ebenfalls nicht statt, da derartige thermische Quellen am Endlagerstandort geologisch auszuschließen sind (siehe auch FEP Magmatismus).

11.4 Standortspezifische Auswirkungen

Keine.

11.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

11.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [X] nicht zu betrachten

11.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

11.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

11.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das FEP wird aufgrund fehlender natürlicher Auslöser nicht berücksichtigt. Es findet weder eine rasche Tiefenversenkung der Gesteinseinheiten statt, noch sind Magmen am Standort zu erwarten. Temperaturerhöhungen durch den radioaktiven Zerfall kurzlebiger Radionuklide werden zur Vermeidung möglicher Metamorphoseeffekte durch eine entsprechende Endlagerauslegung berücksichtigt.

Wirkung in den Teilsystemen: Da die Eintrittswahrscheinlichkeit als „nicht zu betrachten“ eingestuft ist, entfällt eine Wirkung in den Teilsystemen, die Einflüsse der erhöhten Temperatur auf den Carnallit wird im FEP Thermische Carnallitzersetzung betrachtet.

Beeinträchtigung auf Initial-Barrieren: Da die Eintrittswahrscheinlichkeit als „nicht zu betrachten“ eingestuft ist, entfällt eine Beeinträchtigung der Initial-Barrieren.

11.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

11.11 Offene Fragen

Keine.

11.12 Literaturquellen

Braitsch, O. (1962): Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten / von Otto Braitsch. - Berlin [u. a.] : Springer, 1962. - VIII, 232 S. : Ill.

Winkler, H.G.F. (1967): Die Genese der metamorphen Gesteine. Springer-Verlag, Berlin, 2. Aufl.

Weiterführende Literatur:

Brink, H.-J. (2003): Die Entstehung des Norddeutschen Beckens - Ein Metamorphose-Modell. (In: Tagungsbericht 2003-1. Vorträge der Frühjahrstagung des DGMK-Fachbereichs "Aufsuchung und Gewinnung" am 28. und 29. April 2003 in Celle). - DGMK, Band 1: 151-175; Hamburg.

Eskola, P. (1939): Die metamorphen Gesteine. In: Barth, T.F.W., Correns, C.W., Eskola, P. (Hrsg.): Die Entstehung der Gesteine. Springer-Verlag; Stuttgart.

Matthes, S. (1987): Teil 2: Petrologie und Lagerstättenkunde: C. Die Gesteinsmetamorphose - Mineralogie : eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde 2., überarb. u. erw. Aufl.: 307-383; Berlin.

Ramberg, H. (1952): The origin of metamorphic and metasomatic rocks. Univ. of Chicago Press; Chicago.

Vernon, R.H. (1976): Metamorphic processes. Reactions and microstructure development. Allen & Unwin; London.

Wimmenauer, W. (1985): Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine. Enke-Verlag; Stuttgart.

Winkler, H.G.F. (1979): Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer-Verlag, 5. Aufl., 348 pp; New York.

12 Hydrothermale Aktivität (1.2.06.01)

12.1 Definition/Kurzbeschreibung

Hydrothermale Aktivität ist die Zirkulation von Lösungen im Umfeld von magmatischen Intrusionen oder infolge von Regional- und Dynamometamorphose in Verbindung mit tektonischen Prozessen oder großflächigen Absenkungen.

12.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Hydrothermale Lösungen können als Restlösungen bei der Kristallisation magmatischer (bevorzugt granitischer) Schmelzen freigesetzt werden. Außerdem werden bei der Absenkung von Sedimentkomplexen bzw. bei der Regional- und Dynamometamorphose von Gesteinen z. T. große Mengen von wässrigen Lösungen freigesetzt (Entwässerung), die sich bei Vorhandensein entsprechender Migrationsbahnen (Störungszonen) innerhalb der Erdkruste fortbewegen. Im Umfeld der Migrationsbahnen verändern sich die Zusammensetzung und Struktur der Gesteine, in den Migrationsbahnen selbst kann es zur Bildung von hydrothermalen Lagerstätten kommen.

Auf tief reichenden Störungen zirkulierende Wässer werden ausgehend von einer Wärmequelle im Erdmantel („hot spots“) oder einer Magmenkammer in der tieferen Erdkruste erwärmt. Dieses Wasser kann bei einem ausreichenden hydraulischen Gradienten und Vorhandensein von Kluftgrundwasserleitern über weite Distanzen zu einer Quelle migrieren, aus der es zu Tage austreten kann. Aufgrund von Wärmeanomalien kann es auch konvektiv innerhalb der Erdkruste zur Zirkulation von hydrothermalen Lösungen kommen. Im Bereich einer positiven Wärmeanomalie könnten sich vorhandene hydrothermale Lösungen erhitzen und nach oben steigen, gleichzeitig kühlere Lösungen in Richtung Wärmeanomalie fließen. Aufsteigende Lösungen würden sich abkühlen und danach wieder nach unten absinken.

Hydrothermale Aktivität kann unter der Voraussetzung einer Wärmequelle im Untergrund und hinreichender Transportwege (Störungen und Klüfte großer Ausdehnung) über lange Zeiträume wirksam sein. Sie kann aber auch jederzeit, etwa durch Erdbeben, d. h. durch eine Blockade der Transportwege beendet werden. Beispiele für hydrothermale Aktivitäten sind die heißen Quellen von Island.

Hydrothermale Aktivität kann den Stoffbestand und die Eigenschaften von Gesteinen signifikant ändern (Alteration der Gesteine bis zu partiellen Lösungsprozessen), für heiße Quellen und Geysire verantwortlich sein, sowie die Bildung von schichtgebundenen und gangförmigen Minerallagerstätten verursachen. Hydrothermal beeinflusste Sedimente sind in der Regel an tektonisch aktive Randbecken oder an Mittelozeanische Rückensysteme gebunden.

12.3 Sachlage am Standort

Das FEP hat am Standort Gorleben keine Bedeutung, da Plutonismus/Vulkanismus oder bedeutende neotektonische Ereignisse bzw. Prozesse als Voraussetzungen für die Bildung hydrothermalen Lösungen fehlen. Aufgrund des Nichtvorhandenseins magmatischer Aktivitäten sind im Endlagergebiet auch keine Thermalquellen oder thermische Anomalien feststellbar.

12.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Keine.

12.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

12.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [X] nicht zu betrachten

12.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

12.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

12.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Aufgrund der geologischen Gesamtsituation ist am Standort keine hydrothermale Aktivität im Nachweiszeitraum zu erwarten.

Wirkung in den Teilsystemen: Da das FEP nicht zu betrachten ist, sind keine Wirkungen in den Teilsystemen zu betrachten.

Einwirkung auf Initial-Barrieren: Da das FEP nicht zu betrachten ist, hat es keine Auswirkungen auf die Initial-Barrieren.

12.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

12.11 Offene Fragen

Keine.

12.12 Literaturquellen

Lexikon der Geowissenschaften. Edu-Insti (2000). - Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 2; Berlin.

13 Erosion (1.2.07.01)

13.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Oberbegriff für alle zur flächenhaften und linienhaften Abtragung der Erdoberfläche beitragenden Vorgänge, die Boden- und Gesteinsmaterial aus ihrem Verband lockern, lösen und verlagern (inklusive Verwitterung und Massenbewegungen).

13.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Erosion ist ein Oberbegriff für die Abtragungsprozesse, bei denen Material durch Agenzien verlagert wird (fluviale Erosion, glaziale Erosion, Winderosion, marine Erosion). Erosion tritt ein, wenn die vom Agens ausgeübten Kräfte (Scher- / Schubspannungen) Partikel aufnehmen und transportieren können. Manche Autoren zählen daher die Prozesse der Massenbewegungen nicht zur Erosion hinzu. Im deutschen Sprachraum war früher die Beschränkung des Begriffes Erosion auf die Prozesse der linienhaften, fluvialen Erosion üblich. Diesem Erosionsbegriff wurde die mehr flächenhaft wirksame Denudation (flächenhafte Erosion) gegenübergestellt (Lexikon der Geowissenschaften 2000).

Die Erosionsraten sind im Wesentlichen abhängig von der Topographie und Vegetation eines Gebietes, von dem herrschenden Klima und der Art und Zusammensetzung der Gesteine. Im weiteren norddeutschen Umfeld, z. B. im Bereich des Endlagerstandortes Morsleben wurden selbst in einer tektonisch aktiveren Phase in der Zeitspanne vom Oberen Miozän bis Altquartär (ca. 10 Mio. Jahre) nur 100 m bis 200 m Gesteinsmächtigkeiten erodiert (Käbel 2001: Abb. 2), was einer Erosionsrate von 10 m bis 20 m innerhalb einer Million Jahre entspricht. Am südlichen Rand der Norddeutschen Tiefebene im Bereich des morphologisch stärker differenzierten Harzvorlandes liegen die Werte für die flächenhafte Erosion mit 100 m bis 200 m pro Million Jahre seit dem Cromer-Komplex um den Faktor 10 höher (vgl. Feldmann 2002: 118).

13.3 Sachlage am Standort

Die Norddeutsche Tiefebene ist ein tektonisch ruhiges Gebiet, das verglichen mit den sich anschließenden Mittelgebirgen ein nur gering ausgeprägtes Relief besitzt. Es be-

steht keine verstärkte Mobilität der Kruste, die zur raschen Heraushebung und Erosion von Krustenblöcken führt (vgl. FEP Neotektonische Vorgänge). Im Umfeld des Standortes betragen mit Ausnahme des eng begrenzten Höhbeckes (76 m) die topographischen Höhen weniger als 50 m. Bedeutende Reliefunterschiede sind nicht vorhanden, so dass die flächenhafte Erosionsleistung innerhalb des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahren dadurch sicherlich geringer sein wird als an anderen Orten z. B. im südlichen Nordwestdeutschland. Die linienhaft wirkende Erosion durch die Elbe spielt im Gebiet, das sich eher durch einen Absenkungstrend auszeichnet (vgl. FEP Senkung der Erdkruste), kaum eine Rolle. Mit einer sich stetig absenkenden Erdoberfläche ist zukünftig eine Sedimentakkumulation verbunden.

Eine verstärkte Erosion fand während der vergangenen Kaltzeiten durch Gletscherschurf (Exaration) und Schmelzwässer statt. Hierzu ist insbesondere die subglaziale Erosion durch Schmelzwässer mit der Bildung der Gorlebener Rinne zu rechnen (vgl. FEP Glaziale Rinnenbildung).

Kaltzeitliche Vorgänge am Standort können für die Mächtigkeitsbilanz der Deckgebirgsschichten über dem Salzstock im Ergebnis neutral sein: das erodierte Material wird an einem spezifischen Ort rasch durch neue Sedimente (vgl. FEP Sedimentation) ersetzt (Auffüllung von Rinnen und Hohlformen, Bildung von Sanderflächen und Moränen).

13.4 Standortspezifische Auswirkungen

Flächenhafte Erosion führt zur Reduktion der Deckgebirgsmächtigkeit und bewirkt eine Veränderung der Morphologie. Die morphologischen Veränderungen bedeuten in einem tektonisch ruhigen Gebiet eine Einebnung des vorhandenen Reliefs, was Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse durch die Verringerung des hydraulischen Potentials und die hydrologischen Verhältnisse hat.

Die Reduzierung des Deckgebirges am Standort wird wegen des geringen Reliefs allenfalls wenige Meter betragen, was nicht sicherheitsrelevant ist. Lediglich die in geringem Umfang vorhandenen Hochlagen (z. B. Höhbeck) dürften im Nachweiszeitraum eingeebnet werden.

Eine verstärkte Erosion durch Permafrost (Frost-Tau-Wechsel), Gletscherschurf (Exaration) und Schmelzwässer ist während einer erneuten Kaltzeit anzunehmen, wobei es zu einer Umlagerung der transportierten oder der durch das Eis aufgenommenen Sedimente kommt.

Durch eine Erosion des Gletscheruntergrundes werden Glaziale Rinnenbildungen (vgl. FEP Glaziale Rinnenbildung) verursacht, die sich über mehrere Kilometer Breite und zehner Kilometer Länge erstrecken können.

13.5 Zeitliche Beschränkung

Eine flächenhafte Erosion findet ständig statt. Wegen des geringen Reliefs und der Senkungstendenz der Standortregion ist sie aber im Nachweiszeitraum nur gering ausgeprägt. Eine Abweichung hiervon stellen Erosionsvorgänge dar, die während zu erwartender Kaltzeiten zeitlich begrenzt extreme Auswirkungen haben können (siehe FEP Glaziale Rinnenbildung).

13.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

13.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

13.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

13.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Der Prozess ist im Rahmen weiterer zukünftiger Kaltzeiten mit deutlichen Folgen für das Deck- und Nebengebirge als wahrscheinlich einzustufen.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP Erosion ist nur für das Teilsystem Deck- u. Nebengebirge zu berücksichtigen. Das Nahfeld ist wegen der Tiefenlage des Endlagers nicht betroffen. Das Wirtsgestein wird über das FEP Glaziale Rinnenbildung berücksichtigt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Erosion beeinträchtigt indirekt über glaziale Rinnenbildungen die Funktion der Initial-Barriere Wirtsgestein.

13.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Transgression oder Regression

Permafrost

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Begründungen:

Transgression, Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung: Mit den identifizierten, für Kaltzeiten typischen FEP sind eine großräumige flächenhafte und linienhafte Erosion verbunden. Sie sind Voraussetzung für das Wirken der Erosion in diesen speziellen Abschnitten des Nachweiszeitraumes.

Beeinflussende FEP:

Deck- und Nebengebirge

Topografie

Oberflächengewässer

Begründungen:

Deck- und Nebengebirge, Topografie, Oberflächengewässer: Die flächenhafte Erosion wird durch die Ausprägung der vorhandenen Topografie, die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges und das Vorhandensein und die Dynamik der Oberflächengewässer beeinflusst.

Bemerkungen:

Es wären zusätzlich auch solche FEP wie z. B. das FEP Hebung der Erdkruste oder das FEP Magmatismus zu berücksichtigen, wenn diese eine Standortrelevanz aufweisen würden.

Resultierende FEP:

Sedimentation

Begründungen:

Sedimentation: Durch Erosionsprozesse fallen Materialien an, die in jedem Fall an geeigneter Stelle zur Ablagerung kommen. Dabei kann der Ort des Erosionsgeschehens vom Ort einer endgültigen Sedimentablagerung räumlich getrennt sein.

Beeinflusste FEP:

Glaziale Rinnenbildung

Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Begründungen:

Glaziale Rinnenbildung: In Folge einer Erosion des Gletscheruntergrundes kommt es zu glazialen Rinnenbildungen. Das Ausmaß der Erosion beeinflusst die Ausgestaltung glazigener Rinnen.

Deck- und Nebengebirge, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge:
Durch die Erosion werden die Oberfläche, alle oberflächennahen Gesteine und die mit ihnen verbundenen hydrochemischen Verhältnisse beeinflusst.

Topografie: Durch die Erosion werden z. B. Berge eingeebnet, wodurch sich die Topografie ändert.

13.11 Offene Fragen

Keine.

13.12 Literaturquellen

Feldmann, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. - Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: X + 149 S.; Clausthal-Zellerfeld.

Käbel, H. (2001): ERA Morsleben. Geowissenschaftliche Kennzeichnung des Endlagerstandortes unter Verwendung der 'Internationalen FEP-Liste' der NEA-Datenbank. Abschlussbericht. - BGR, unveröffentl. Ber., 0120434; Berlin.

Lexikon der Geowissenschaften (2000): Edu-Insti. - Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 2: 506 S.; Berlin.

Schroeder, J. H. (1995): Die Kreuzbrückenspalte von Rüdersdorf - subglaziale Erosion im Wellenkalk. - Berliner geowiss. Abh., Reihe A, Bd. 168: 177-189; Berlin.

14 Sedimentation (1.2.07.02)

14.1 Definition/Kurzbeschreibung

Sedimentation ist der Absatz von Feststoffpartikeln in einem Fluid.

14.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Verstärkte Absenkungstendenzen des Untergrundes in der nahen geologischen Vergangenheit (z. B. Nordseebecken, Niederrheinische Bucht) verursachten große Sedimentmächtigkeiten. Größere Sedimentakkumulationen sind auch möglich durch den Transport eines vorrückenden Inlandeises, ohne dass eine verstärkte regionale Subsidenz vorliegen muss.

Es kann zwischen klastischen, chemischen und biogenen Sedimenten unterschieden werden. Klastische Sedimente bestehen aus den zerbrochenen Bruchstücken und Partikeln des Ausgangsgesteins. Chemische Sedimente bilden sich aus der Ausfällung gelöster Salze, Silikate und Karbonate. Biogene Sedimente sind auf die Überreste von organischen Materialien wie Schalengehäuse, Knochen oder Pflanzenreste zurückzuführen.

14.3 Sachlage am Standort

Die zurzeit ablaufende Sedimentakkumulation ist am Standort Gorleben wegen einer fehlenden deutlichen Absenkung des Gebietes (ca. Zehnermeterbereich für eine Dauer des Nachweiszeitraumes, vgl. FEP Senkung der Erdkruste) grundsätzlich nur gering.

Im Verlauf früherer Kaltzeiten sedimentierten allerdings große Materialmengen durch das Wirken des Inlandeises als Moränen bzw. durch die abfließenden Schmelzwässer im Gletschervorland oder im Urstromtal der Elbe. Zu Zeiten ohne Eisbedeckung und mit Permafrost konnte es durch Solifluktion zu Sedimentbildungen kommen. In der Gorlebener Rinne akkumulierten mächtige Schmelzwassersedimente, der tonig-schluffige bis sandige Lauenburger-Ton-Komplex und holsteinzeitliche Sedimente. Die Mächtigkeit der gebildeten Sedimente kann in Abhängigkeit von exarativ oder hydro-mechanisch geschaffenen Hohlformen oder der Ablagerung von Endmoränen lokal er-

heblich sein und mehrere zehner bis mehr als hundert Meter betragen (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung, FEP Glaziale Rinnenbildung).

14.4 Standortspezifische Auswirkungen

Im Zuge einer neuen Kaltzeit ist mit einer verstärkten Sedimentation zu rechnen, die gleichzeitig aber von erosiven Prozessen begleitet sein wird. Das Wechselspiel zwischen Erosion und anschließender Sedimentation in Hohl- und Ausräumungsformen kann zu erheblichen Mächtigkeiten neuer Sedimentabfolgen führen, was nach Ablauf einer Kaltzeit eine neue lithologische Zusammensetzung des Deck- und Nebengebirges ergibt. Damit einhergehend kann eine Veränderung potentieller Migrationswege im Deckgebirge verbunden sein.

Die Sedimentation von fluviatil bzw. glazifluviatil, äolisch oder im Zuge einer Transgression transportierten Gesteinspartikeln verschiedener Korngröße bedeutet eine Veränderung der Oberflächenmorphologie. Zu den Folgen der Sedimentation gehört auch die Auffüllung von Hohlformen bis zum Reliefausgleich (z. B. Erdfälle, Subrosionssenken). Darüber hinausgehende Sedimentakkumulationen durch Wind, Wasser oder Eis schaffen neue Reliefformen wie Dünen, Schuttfächer oder Endmoränen (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung).

Durch Sedimentation ergibt sich eine Erhöhung der Gesamtmächtigkeit des Deck- und Nebengebirges. Kompaktion und Diagenese der Deckgebirgsschichten werden wegen der zu erwartenden dynamischen Entwicklung des Deck- und Nebengebirges während zukünftiger Kaltzeiten keine sicherheitsrelevanten Veränderungen neuer Sedimentabfolgen bewirken. Eine zusätzliche Auflast durch neue Sedimentschichten auf Grund einer Subsidenz des Standortgebietes überträgt sich prinzipiell auch auf das Wirtsgestein. Die Erhöhung des Überlagerungsdruckes mit entsprechend veränderten Spannungsverhältnissen im Wirtsgestein und Nahfeld wird entsprechend der geringen Sedimentation nur sehr langsam wirksam und hat daher keinen Einfluss z. B. auf die mechanischen Wechselwirkungen mit dem Wirtsgestein.

14.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Eine verstärkte Sedimentation findet aber nur während zukünftiger Kaltzeiten statt.

14.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

14.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

14.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

14.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Der Prozess ist wahrscheinlich und insbesondere im Rahmen von Kaltzeiten bedeutsam, wenn durch die Gletschertätigkeit oder durch andere eiszeitlich bedingte Vorgänge weitere Sedimente über dem Standort abgelagert werden. Wegen der geringen Senkungstendenz am Standort (vgl. FEP Senkung der Erdkruste) ist nur eine geringe Sedimentation möglich. Entsprechende großräumige und tiefe Becken für eine Sedimentakkumulation werden im Nachweiszeitraum nicht gebildet.

Wirkung in den Teilsystemen: Die Teilsysteme Deck- u. Nebengebirge sowie Wirtsgestein sind zu berücksichtigen. Das FEP Sedimentation beeinflusst den Aufbau, die Mächtigkeit der Gesteinsabfolge und verursacht eine größere Last auf das Wirtsgestein.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Beeinträchtigungen der Initial-Barriere Wirtsgestein erfolgen indirekt über das FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung durch eine kaltzeitlich bedingte Sedimentakkumulation.

14.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Erosion

Begründungen:

Erosion: Die Erosion von Gesteinen ist die Voraussetzung für die Sedimentation von Feststoffpartikeln. Der Ort des Erosionsgeschehens kann vom Ort einer endgültigen Sedimentablagerung räumlich getrennt sein.

Beeinflussende FEP:

Transgression oder Regression

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Glaziale Rinnenbildung

Auflösung und Ausfällung

Topografie

Oberflächengewässer

Begründungen:

Alle genannten FEP: Die identifizierten FEP beeinflussen das FEP Sedimentation durch die Bereitstellung von Mechanismen für den Materialtransport und von topographischen Hohlformen, welche zur Bildung neuer Ablagerungen führen.

Resultierende FEP:

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Durch eine veränderte Sedimentauflast in Folge kaltzeitlicher Prozesse kommt es zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein.

Beeinflusste FEP:

Diagenese

Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Begründungen:

Diagenese: Durch Sedimentablagerungen kommt es zu einer erhöhten Auflast auf die der darunter liegenden Schichten und zu ihrer Kompaktion.

Deck- und Nebengebirge, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge, Topografie: Durch die Sedimentation von Feststoffpartikel werden die Mächtigkeit und Topographie des Deck- und Nebengebirges und die damit verbundenen hydrochemischen Verhältnisse verändert.

Bemerkungen:

Das FEP Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge wird indirekt über das FEP Deck-und Nebengebirge berücksichtigt.

14.11 Offene Fragen

Keine.

14.12 Literaturquellen

Weiterführende Literatur:

Bridge J. S., Demicco, R. V. (2008): Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits. - Cambridge University Press: 815 S.; Cambridge/U.K.

Huddart, D., Stott, T. (2010): Earth Environments. Past, Present and Future. - J. Wiley & Sons: 896 S.; Cichester/U.K.

Smithson, P., Addison, K., Atkinson, K. (2008): Fundamentals of the Physical Environment. - Routledge, 4. Aufl.: 776 S.; London/U.K.

15 Diagenese (1.2.08.01)

15.1 Definition/Kurzbeschreibung

Diagenese ist die, z. B. durch Druck- und Temperaturänderungen, chemische Lösung sowie Ausfällung, lang- oder kurzfristig ablaufende Umbildung lockerer Sedimente zu festen Sedimentgesteinen.

15.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Eine einheitliche, weltweit gültige Definition für die Diagenese existiert nicht. Die hier zusammengestellten Informationen orientieren sich an Murawski (2010). Die als Diagenese bezeichnete Verfestigung von Lockersedimenten umfasst in der Regel die Prozesse Kompaktion, Zementation, Stoffdiffusion (inkl. Fluidbewegungen), Mineralneubzw. -umbildung und Lösung. Bei der Diagenese kommt es zur Entstehung von Mineralvergesellschaftungen, die sich nicht primär durch Sedimentation bilden können, wie z. B. Albit, Sericit oder Chlorit. Die Grenze zwischen Diagenese und Metamorphose wird etwa mit der Neubildung von Mineralen der Zeolithfazies gezogen. Dafür sind in etwa Drücke von 3 – 4 kbar und Temperaturen von mehr als ca. 100 – 200 °C erforderlich. Die unterhalb dieser p-T-Bedingungen ablaufenden diagenetischen Prozesse führen zu einer Verringerung der Porosität und der Wassergehalte der Sedimente.

Durch Diagenese können sich Gesteinseigenschaften wie Permeabilität, Porosität, Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit junger, unverfestigter Sedimente verändern. Der Ablauf und die Intensität diagenetischer Prozesse werden entscheidend vom Sedimenttyp beeinflusst. Es werden deutliche Unterschiede zwischen Salzablagerungen, Tonen, Sanden und Karbonaten festgestellt.

Salzablagerungen: Nach Ablagerung und Überdeckung durch weitere Sedimentschichten erfolgt druckbedingt eine Kompaktion und das Entwässern der Evaporite, die von Umkristallisationsprozessen begleitet sind. Primär gebildete Gips-haltige Salinargesteine werden im Verlaufe der Diagenese unter Wasserabgabe in Anhydritgesteine umgewandelt. Bei Anhydritgesteinen kann es zur Bildung von Stylolithen kommen, wobei durch den Prozess der Drucklösung ein erheblicher Anteil der Sulfate in gelöster Form abtransportiert werden kann. Massenberechnungen mit Hilfe von Stylolithen-Amplitudenhöhen ergaben für den Hauptanhydrit des Salzstocks Gorleben Lösungsbe-

träge von 19 und 26 % (Bäuerle 1998; Bäuerle et al. 2000). Diese Werte weisen auf einen erheblichen Materialumsatz während der Diagenese nach Ablagerung der Salzgesteine hin.

Ton: Die wichtigsten Prozesse auf dem Weg von frisch sedimentierten Tonen zu Tonsteinen sind Kompaktion, Porenwasserabgabe und die Veränderung der mineralogischen Zusammensetzung. Frisch sedimentierte Tone weisen ein lockeres Gefüge mit 70-90 % Porosität auf, das aber bedingt durch die geringe Korngröße der Tonminerale mit einer geringen Permeabilität einhergeht. Der Druck überlagernder Sedimente verursacht eine Abgabe der Porenwässer und eine entsprechende Abnahme der Porosität (Kompaktion), die bei reinen Tonsteinen mit zunehmender Versenkungstiefe einer logarithmischen Kurve folgt. Beeinflusst wird die Kompaktion durch die Salinität des Porenwassers, den Carbonatgehalt und die Tonmineralogie der Gesteine (v. Engelhardt 1973).

Sande: Die wesentlichsten Umwandlungen bei der Diagenese von Sandsteinen betreffen die Reduzierung der Porosität durch Kompaktion und die Ausfällung authigener Minerale (Zementation) sowie die Auflösung instabiler Komponenten. Als Zementminerale treten häufig Calcit, Dolomit, Anhydrit, Goethit und Siderit auf. Die Art und Reihenfolge der Zementbildung in einem Sandstein ist nicht einheitlich, sondern spiegelt Änderungen der Porenwasser-Chemie und die diagenetische Geschichte des Sedimentpakets wider. Da der Fluidfluss in einem Sedimentbecken maßgeblich von der Tektonik (Störungen, Klüftung) und den Wegsamkeiten in den Beckensedimenten abhängt, sind vertikale und laterale Differenzierungen der Zementation die Regel. Bei sehr tiefer Versenkung wird der Porenraum meist vollständig durch Zement gefüllt.

Karbonate: Wegen der stark wechselnden primären Zusammensetzung von Karbonatsedimenten sind diagenetische Prozesse in diesen Gesteinen besonders vielfältig. Sie können bereits synd sedimentär auf dem Meeresboden beginnen und bis zum fließenden Übergang in die Metamorphose bei erhöhten Druck-Temperatur-Bedingungen andauern. Die Karbonatdiagenese beinhaltet mikrobiell induzierte Mikritisierung, Zementation (Karbonatzemente), Neomorphose, Lösung, Kompaktion einschließlich Drucklösung (Bildung von Stylolithen) und Dolomitisierung.

15.3 Sachlage am Standort

Sowohl die Gesteine des Salzstocks Gorleben als auch teilweise die Sedimente des Nebengebirges haben im Verlaufe ihrer Absenkung auf bis zu 3.000 m Tiefe intensive diagenetische Veränderungen durchlaufen. Aktuell und im Verlaufe des Nachweiszeitraumes laufen diagenetische Prozesse am Standort lediglich in Teilen der Deckgebirgsschichten, d. h. in den oberen Bereichen der quartärzeitlichen Sedimente ab. Diese bestehen aus Tonen, Sanden und Kiesen oder deren Mischungen. Unverfestigte Karbonate kommen nicht vor. Die älteren Deckschichten und Nebengesteine des Mesozoikums sowie die Salinargesteine des Salzstockes selbst sind dagegen bereits diagenetisch verändert.

15.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Da das Gebiet um Gorleben innerhalb der nächsten Million Jahre nur eine geringe Senkung erfahren wird (Frischbutter 2001, Ludwig 2001, vgl. FEP Senkung der Erdkruste), ändern sich die Druck- und Temperaturverhältnisse in den meso- und känozoischen Gesteinen nur unwesentlich. Deshalb sind nur geringfügige diagenetisch bedingte Veränderungen in den obersten Quartärsedimenten zu erwarten. Durch chemische Prozesse können sich im Rahmen der Diagenese die Porosität und Permeabilität der Quartärsedimente verändern. Die Gesteine der Salinarformation haben die Diagenese bereits vor etwa 200 Mio. Jahren durchlaufen.

15.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

15.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit:

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

15.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

15.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

15.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Diagenese findet im Nachweiszeitraum in Teilen der Schichten des Deck- und Nebengebirges in Folge chemischer und geringfügiger thermischer Prozesse sowie von Kompaktionsvorgängen statt. Sie ist damit als "wahrscheinlich" einzustufen.

Wirkung in den Teilsystemen: In den Sedimenten des Deck- und Nebengebirges sind diagenetische Prozesse gewiss. Aufgrund der abgeschlossenen Diagenese der Zechsteinsedimente sind in den Salzgesteinen keine weiteren diagenetischen Umbildungsprozesse zu erwarten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Aufgrund der abgeschlossenen Diagenese der Zechsteinsedimente sind in den Salzgesteinen keine weiteren diagenetischen Umbildungsprozesse zu erwarten.

15.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Sedimentation

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Auflösung und Ausfällung

Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Vollständige Inlandvereisung, Inlandvereisung in randlicher Lage, Sedimentation: Eine vollständige oder teilweise Überlagerung des Standortes mit Inlandeis kann durch den Überlagerungsdruck die Sedimentkompaktion fördern. Entsprechendes gilt für die Ablagerung neuer Sedimentschichten.

Auflösung und Ausfällung: Auflösungsprozesse oder Zementation sind wichtige diagenetische Prozesse.

Deck- und Nebengebirge: Die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges haben Auswirkungen auf den Verlauf der Diagenese.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge beeinflussen die Art und den Umfang der Diagenese.

Bemerkungen:

Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge: Mikrobielle Prozesse beeinflussen die Diagenese indirekt über die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Porosität

Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Porosität: Mit der Sedimentkompaktion und in Folge chemischer Prozesse kann sich die Porosität der Sedimentschichten ändern.

Deck- und Nebengebirge: Die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges werden durch die Kompaktion und die mit der Diagenese verbundenen chemischen Prozesse beeinflusst.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge können durch die mit der Diagenese verbundenen chemischen Prozesse beeinflusst werden.

Bemerkungen:

Mikrobielle Prozesse im Deck und Nebengebirge werden durch die Diagenese nur indirekt über eine Änderung der hydrochemischen Verhältnisse beeinflusst.

15.11 Offene Fragen

Keine.

15.12 Literaturquellen

Bäuerle, G. (1998): Sedimentäre Texturen und Stylolithen am Top des Hauptanhydrits (Zechstein 3) im Salzstock Gorleben. - Univ. Hannover, Dipl.-Arb.; Hannover.

Bäuerle, G., Bornemann, O., Mauthe, F., Michalzik, D. (2000): Origin of Stylolithes in Upper Permian Zechstein Anhydrite (Gorleben Salt Dome Germany). - J. Sed. Res., 70/3: 726-737; Lawrence/Canada.

Engelhardt, W. V. (1973): Sediment-Petrologie, Teil III: Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen. - Schweizerbart: 378 S.; Stuttgart.

Frischbutter, A. (2001): Recent vertical movements (map 4). (In: Garetsky, R. G.; Ludwig, A. O.; Schwab, G., Stackebrandt, W. (Hrsg.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 27-31; Kleinmachnow.

Füchtbauer, H., Müller, G. (1977): Sediment-Petrologie, Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine. - Schweizerbart, 3. Aufl.: 726 S.; Stuttgart.

Ludwig, A. O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). (In: Garetsky, R. G.; Ludwig, A. O.; Schwab, G. & Stackebrandt, W. (Hrsg.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 5-12; Kleinmachnow.

Murawski, H., Meyer, W. (2010): Geologisches Wörterbuch. 12. Edition, ISBN 3827418100, Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg.

Weiterführende Literatur:

Müller, T. (1999): Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie. Deutsch-Englisch. - Springer, 1. Aufl.: 367 S.; Berlin.

Ronov, A. B. (1971): Allgemeine Entwicklungstendenzen in der Zusammensetzung der äußeren Erdhülle. - Ber. DGGW, A16, 3/5: 331-350; Berlin.

Ruchin, L. B. (1958): Grundzüge der Lithologie. - Akademie-Verlag: 806 S.; Berlin.

16 Diapirismus (1.2.09.01)

16.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Diapirismus wird das Aufdringen von Salzgesteinen aus tieferen Bereichen der Erdkruste verstanden. Maßgeblich für das Aufdringen sind ein ausreichender Überlagerungsdruck durch jüngere Gesteine und das Vorhandensein von Schwächezonen im Gebirge, eine ausreichende Mächtigkeit von mobilisierbarem Salz sowie in vielen Fällen den Salzaufstieg auslösende Bewegungen an Störungen im präsalinaren Sockel.

16.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die mit autonomen Salzbewegungen aus tieferen Bereichen verknüpften Vorgänge werden unter dem Begriff der Halokinese zusammengefasst (Trusheim 1957). Eine der Voraussetzungen für das Abfließen des Prozesses ist eine instabile Dichteschichtung (Rayleigh-Taylor-Instabilität). Bei der Absenkung eines Beckens tritt diese in Bezug auf Steinsalzschiefer ein, wenn die Deckschichten infolge der Kompaktion eine durchschnittliche Dichte von $2,2 \text{ g/cm}^3$ erreicht haben. Dies ist bei einer Überdeckung durch klastische Sedimente von wenigen hundert Metern gegeben und bei einer Mitwirkung karbonatischer oder sulfatischer Ablagerungen bereits ab etwa 100 m. Die potenzielle Energie aus der instabilen Dichteschichtung, die für die Initiierung der Bildung von Salzstrukturen zur Verfügung steht, hängt von der Mächtigkeit und dem Aufbau der salinaren Formation sowie von der Mächtigkeit und der Lithologie der Deckschichten ab. Salzstöcke bilden sich bevorzugt über Störungszonen im präsalinaren Sockel. Nur wenige Salzstöcke zeigen diese Störungen im präsalinaren Sockel nicht. Bereits vorhandene Schwächezonen im überlagernden Deckgebirge begünstigen den Durchbruch des Salinars durch das Deckgebirge.

In Regionen, in denen Salz abwandert, sinken die Deckschichten nach und es entstehen Senken (primäre bzw. sekundäre Randsenken), in denen verstärkt sedimentiert wird. Beim Aufdringen des Salzes können sich, durch die damit verbundene Aufwölbung im Deckgebirge, Grabenstrukturen bilden.

16.3 Sachlage am Standort

Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben lässt sich mit Hilfe der Schicht abfolgen vom Zechstein bis Quartär auf und neben der Salzstruktur rekonstruieren (Zirngast et al. 2004). Der Zechstein besaß vor Beginn des Diapirismus im Gebiet eine Mächtigkeit von ca. 1.400 m. Dieser Wert ergibt sich als Voraussetzung für die Bildung der mächtigen Randsenken im Keuper. An Hand der für das Salzeinzugsgebiet des Salzstocks Gorleben durchgeführten Randsenkenanalyse wird eine sicher nachgewiesene Mindestmächtigkeit des primären Zechsteins von 1.150 m abgeleitet. Alle weiteren Werte beziehen sich auf diese (Köthe et al. 2007, S. 169ff).

In den Salzstock sind 64 % des primären Zechsteins eingewandert. Der Einzugsbereich umfasst 376,4 km², hier sind noch 185,6 km³ Salz vorhanden. Im Salzstock selbst sind, einschließlich Hutgestein und präsalinarem Zechstein 94,67 km³ vorhanden. Der Zechstein weist heute im unmittelbaren Umfeld des Salzstocks nur noch Restmächtigkeiten von 100 bis 500 m auf. Die Zechsteinbasis liegt in der Region heute in einer Tiefe von -3.100 bis -4.450 m. Direkt unterhalb des Salzstocks Gorleben ist die Zechsteinbasis als Hochlage ausgebildet, was zur Entstehung des Salzstocks beitrug. Die Auswertung seismischer Salzstockunterschießungen (Marschall et al. 1984) ergab keine bedeutenden Störungszonen im präsalinaren Untergrund, die den Salzaufstieg eingeleitet haben könnten.

Beim Salzaufstieg traten im Bereich des Hauptsalzes in Höhe der geplanten Einlagerungssole in 870 – 900 m Tiefe Salzfließgeschwindigkeiten von max. 0,34 mm/Jahr während der Oberkreide und bis 0,07 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär auf. Die eingewanderten Salzmenen hoben dabei die Salzstockoberfläche etwa 0,08 mm/Jahr zur Oberkreidezeit und etwa 0,02 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär. Die Berechnungen zur Randsenkenanalyse belegen, dass die Salzeinwanderung seit ihrem Maximum in der Oberkreide bis zur jüngsten geologischen Vergangenheit stetig abnahm. Eine Zunahme der Aufstiegsraten innerhalb der nächsten Million Jahre würde hohe kompressive Spannungen und eine sehr starke Subsidenz des Gebietes mit einer Neubildung von Sedimenten voraussetzen. Eine derartige Entwicklung kann jedoch für den Endlagerstandort nicht prognostiziert werden, so dass die Aufstiegsrate des Zeitraums Miozän bis Quartär auch für die kommende Million Jahre angenommen wird. Ohne Berücksichtigung von Subrosion würde dies zu einer Hebung des Salzspiegels um etwa 20 m im Nachweiszeitraum führen.

16.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das Hauptsalz der Staßfurt-Folge bildet den Zentralteil des Sattels und den Überhang des Salzstockes. Im Grenzbereich von der Staßfurt- zur Leine-Folge kam es im Verlaufe des Salzaufstiegs aufgrund des lithologischen Aufbaus und der Kompetenzunterschiede der dort vorhandenen Gesteine zu komplexen Fließfaltungen. Der zentrale Hauptsalzsattel und die anschließenden Mulden mit Salzgestein der Leine- und Aller-Folge, die in Längsrichtung des Salzstocks ausgerichtet sind, können durch Querfaltung speziell gegliedert sein. Das Hauptsalz war auf Grund seiner großen primären Mächtigkeit von ca. 800 m und seiner hohen Mobilität der Motor des Salzaufstiegs. Die jüngeren Schichten reagierten passiv auf den Salzaufstieg, d. h., sie wurden durch die Salzgesteine der Staßfurt-Folge mitgeschleppt und in z. T. extreme Isoklinalfalten gelegt.

Für den Nachweiszeitraum wird eine Salzbewegung von maximal 70 m für das z2 des Kernbereichs des Salzstocks auf Höhe der 840-m-Sohle angenommen, wobei der Salzstock im Niveau des Salzspiegels aber nur um 20 m aufsteigen würde. Möglicherweise wird der Aufstieg aufgrund einer Überlagerung durch Inlandeis und einer damit verbundenen höheren Auflast beeinflusst (Köthe et al. 2007, vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung, FEP Permafrost und FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung).

Durch den Aufstieg des Hauptsalzes können die Abfälle ebenfalls mit angehoben und Verschlussbauwerke in ihrer Position verändert werden.

16.5 Zeitliche Beschränkung

Keine Einschränkung innerhalb des Nachweiszeitraumes. Für die nächste Million Jahre ist davon auszugehen, dass aufgrund der geringen verbliebenen Mengen mobilisierbaren Hauptsalzes im Bereich der Kissenfüße und unter dem Einfluss des rezenten dilatativen Hauptspannungsfeldes keine erneute massive Salzeinwanderung in die Struktur mit entscheidenden Änderungen der geologischen Standortverhältnisse stattfindet.

16.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

16.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

16.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein, Strecken-, Schachtverschlüsse

16.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Ein Diapirismus ist wahrscheinlich, da die vorhandenen restlichen Salze in den Randsenken aufgrund der Dichteunterschiede und des bestehenden regionalen Spannungsfeldes geringe Aufstiegsraten ermöglichen.

Wirkung in den Teilsystemen: Trotz der geringen Salzbewegungen sind strukturelle Veränderungen im Bereich aller Endlagerteilsysteme denkbar, so dass mögliche Auswirkungen berücksichtigt werden müssen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Durch die Bewegung des Salzgesteins ergeben sich direkte Beeinträchtigungen auf die Initial-Barrieren.

16.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inlandvereisung in randlicher Lage

Wirtsgestein

Begründungen:

Inlandvereisung in randlicher Lage: Eine randliche Bedeckung des Standortes durch mächtiges Inlandeis vermag evtl. durch seine Auflast den Salzaufstieg zu beeinflussen.

Wirtsgestein: Die verschiedenen Salzgesteine sind unterschiedlich kriechfähig und beeinflussen dadurch den Aufstieg des Salzkörpers.

Bemerkungen:

Als beeinflussende FEP käme das FEP Sedimentation in Frage, wenn in Folge einer verstärkten Absenkung des Gebietes und damit Sedimentbildung ein weiterer Aufstieg des Restsalzes initiiert würde. Da die Absenkungsgeschwindigkeit (vgl. FEP Senkung der Erdkruste) im Nachweiszeitraum aber gering bleibt, wird das FEP Sedimentation an dieser Stelle nicht aufgeführt.

Resultierende FEP:

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

Begründungen:

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Der Salzaufstieg führt dazu, dass Schachtverschlüsse in ihrer Lage verändert werden.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Innerhalb des Salzgesteins treten durch die Bewegung der Gesteinsschichten Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen auf.

Hebung oder Absenkung von Endlagerbehältern: Der Salzaufstieg führt dazu, dass die Abfallbehälter sich mit dem Salzgestein bewegen.

Beeinflusste FEP:

Subrosion

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Sonstige Verschlussbauwerke

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Wirtsgestein

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein Deck- und Nebengebirge

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Salzbewegungen im Zuge des Diapirismus können Bohrungsabschnitte gegeneinander versetzen.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: Eine Verschiebung der Dichtelemente die die Auslegung überschreitet, kann zum Versagen eines Schachtverschlusses führen.

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: Durch Salzbewegungen können sich die Elemente der Barriere gegeneinander verschieben.

Ausfall eines Dichtpfropfens: Durch Salzbewegungen kann der Dichtpfropfen verschoben werden. Je nach Intensität dieser Bewegung kann es zu einem Ausfall des Dichtpfropfens kommen.

Bohrlochverrohrung: Verschiebungen im Salz können sich auf die Bohrlochverrohrungen auswirken.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Durch laterale Salzbewegungen kann es zu einer Beschädigung der Bohrlochverrohrung kommen.

Sonstige Verschlussbauwerke: Diapirismus kann zu Verschiebungen im Grubengebäude und in der Folge zu mechanischen Lasten auf die Verschlussbauwerke führen.

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften: Einrichtungen, wie z. B. Streckeneinbauten oder Schienen, werden durch den Diapirismus beeinflusst.

Subrosion: Durch den Salzaufstieg gelangt der Salzspiegel in einen Bereich mit höherer Grundwasserströmung, wodurch die Subrosion verstärkt werden kann.

16.11 Offene Fragen

Auswirkung von Kaltzeiten auf das Aufstiegsverhalten des Salzstocks.

16.12 Literaturquellen

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72: 201 S.; Hannover.

Marschall, R., Neumann, R. (1984): DZ-Bericht - Gorleben 1984 - über die Salzstockunterschließung im Konzessionsgebiet Gorleben. - Bericht 840 005 51 erstellt im Auftrag der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), 17 S., 44 Anl., Prakla-Seismos GmbH, Hannover.

Trusheim, F. (1957): Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. - Z. dt. geol. Ges., 109/1; Hannover.

Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht. - BGR, Ber.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über-und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Duphorn, K. (1984): Quartärgeologische Ergebnisse und Probleme bei der Endlagerforschung Gorleben. - Univ. Kiel, Paläont. Inst., Berichte-Reports 6: 47 S.; Kiel.

Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U., Schröder, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben, Abschl.-Bericht Univ. Kiel. - Univ. Kiel (PTB-Bestell-Nr. 73760; BGR-Archiv-Nr. 103 714): 265 S.; Kiel.

Jaritz, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. - Geol. Jb., A 10: 77 S.; Hannover.

Jaritz, W. (1980): Einige Aspekte der Entwicklungsgeschichte der nordwestdeutschen Salzstöcke. - Z. dt. geol. Ges., 131/2: 387-408; Hannover.

Jaritz, W. (1994): Die Entwicklungsgeschichte des Standortes Gorleben als natürliches Analogon für das Langzeitverhalten eines Barrierensystems. - Z. dt. geol. Ges., 145/1: 192-206; Hannover.

Jaritz, W. (1995): Stellungnahme zu Gutachten, die im Auftrag des NMU zur Eignungshöflichkeit des Standortes Gorleben angefertigt wurden. - BGR, Ber., 114026: 134 S.; Hannover.

Kockel, F. (1999): Die Bildung von Salzstrukturen in Norddeutschland - neue Einsichten, offene Fragen. - Mitt. dt. Geophys. Ges., 3: 38-47; Potsdam.

Lexikon der Geowissenschaften. Edu-Insti (2000). - Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 2; Berlin.

Meyer, K.-D. (1980): Stellungnahmen zu den Thesen von E. Grimmel. 2. Quartäre Tektonik im Unterelbe-Gebiet? - Z. dt. geol. Ges., 131: 530-546; Hannover.

Zirngast, M. (1990): Begrenzung und Volumen des Salzstocks Gorleben. - BGR, Ber., 106565: 8 S.; Hannover.

17 Subrosion (1.2.09.02)

17.1 Definition/Kurzbeschreibung

Subrosion ist die unter der Erdoberfläche durch Grundwässer stattfindende Ablaugung an Evaporitgesteinen.

17.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Lösungs- und Reaktionsfähigkeit der Chlorid- und Sulfatminerale von Salzgesteinen ist abhängig von verschiedenen Faktoren: Temperatur, Wasser-Gestein-Verhältnis (Verfügbarkeit von Lösung), Typ des Reaktionssystems (offenes, Durchfluss- oder geschlossenes System), mineralogische Zusammensetzung des Gesteins und chemische Zusammensetzung der zutretenden Lösungen. Eine Salzauflösung (Subrosion) findet in der Regel am Salzspiegel statt, da an Salzmineralen ungesättigtes Grundwasser bei entsprechender Ausbildung des Deckgebirges auf das Salzgestein einwirken kann. Subrosion reduziert mit der Zeit die Mächtigkeit der Barriere Wirtsgestein.

Das sich durch diese Prozesse ausbildende Hutgestein der Salzstruktur wird an seiner Basis durch den sogenannten Salzspiegel begrenzt. Der Salzspiegel weist aufgrund der darunter anstehenden unterschiedlichen Salzgesteine in der Regel ein morphologisch gegliedertes Relief mit Höhen und Senken auf, in letzteren können sich gesättigte Lösungen sammeln. An diesen Stellen können infolge geringer Grundwasserfließgeschwindigkeiten sowie einer Dichteschichtung über längere Zeit die Subrosionsraten sehr klein bleiben bzw. können aus gesättigten Lösungen Steinsalz und Gips kristallisieren.

Die Subrosionsraten von Salzstöcken können je nach geologischer Situation unterschiedlich hoch sein. Die wesentlichsten Einflussfaktoren sind die Teufenlage, die Aufstiegsrate und der innere Bau der Salzstöcke sowie die hydrogeologischen Bedingungen im Deckgebirge bzw. im Grenzbereich Salzstock/Deckgebirge. Grob verallgemeinernd findet Ablaugung an den in Nordwestdeutschland vorkommenden Salzstöcken bis in eine Tiefe von ca. 420 m statt, wobei Ablaugungsprozesse, die tiefer als ca. 180 m reichen, besondere Randbedingungen erfordern (vgl. Keller 1990). Intensive Subrosionsprozesse können, ähnlich wie bei Karstbildungen, infolge von partieller Salzauflösung zur Entstehung von großen Hohlräumen im Hut von Salzstrukturen mit

häufig daran gebundenen Subrosionssenken, Erdfällen oder Grundwasserversalzungen führen. Die von unterschiedlichen Autoren angewandten Methoden zur Bestimmung der Subrosionsraten werden von Bornemann et al. (2008) und Köthe et al. (2007) diskutiert.

17.3 Sachlage am Standort

Das Subrosionsgeschehen am Standort Gorleben ist in der Vergangenheit durch den Salzstockaufstieg und eine zeitweilig oberflächennahe Position des Salzstocks charakterisiert. Lokal eng begrenzt wurde der Topbereich des Salzstocks zusätzlich durch die elsterzeitlich angelegte quartäre Rinne bzw. durch kaltzeitliche Prozesse (Permafrost, Inlandvereisung, z. B. Boulton et al. 2001) beeinflusst, ohne dabei eine tief eingeschnittene Subrosionssenke auszubilden. Für den Zeitraum Miozän bis Quartär wurden Subrosionsraten von 0,01 mm/Jahr bis 0,02 mm/Jahr bestimmt (Zirngast 1990, 1991; Zirngast et al. 2004). Wenn von einer subrosiven Absenkung der Hutgesteinsoberfläche um durchschnittlich 57 m im Zeitraum vom Cromer- bis Menap-Komplex ausgegangen und für diesen Zeitraum ca. 800.000 Jahre Dauer angesetzt wird, ergeben sich daraus Subrosionsraten von ca. 0,07 mm/Jahr. Zusätzlich dienten die Ausbildung der Hutgesteinsbrekzie und die Bildung des geschichteten Gips- und Anhydritgesteins (Bornemann et al. 2008) sowie die Lage der Holsteinbasis über dem Salzstock (Appel & Habler 1998) als Grundlage für die Abschätzung der Subrosionsraten für das Quartär. Die auf diesen Daten basierenden durchschnittlichen Ablaugungsraten schwanken zwischen 0,2 mm/Jahr bis 0,3 mm/Jahr. Ähnliche Raten (0,2 bis 0,4 mm/Jahr) geben Köthe et al. (2007) für die Saale-Kaltzeit an. Für den Zeitraum der letzten 127.000 Jahre, d. h. seit dem Beginn der Eem-Warmzeit, konnten über der Salzstruktur Gorleben im zentralen Bereich bis zum südwestlichen Ende des Salzstocks keine Subrosions- oder Einsenkungsbewegungen (Subsidenz) mit geologischen Methoden nachgewiesen werden. Einige Grundwässer zeigen im tieferen Bereich der Rinne Isotopensignaturen, die kombiniert mit ihrer lokalen Position und dem holozänen Alter der Wässer eine geringe rezente Subrosion am Salzspiegel wahrscheinlich machen (Klinge 1994; Klinge et al. 2004; Klinge et al. 2000; Klinge et al. 1998; Zirngast et al. 2004). Für relativ geringe Subrosionsraten spricht auch das Fehlen von Subrosionssenken bzw. -seen oberhalb des Salzstocks Gorleben. Die sehr geringe Subrosionstätigkeit wird auch durch die Tatsache unterstrichen, dass verglichen zu früheren Kaltzeiten der Salzspiegel tiefer liegt, so dass gering mineralisierte Grundwässer weniger gut an das Salz gelangen.

Neben der, vom am Salzspiegel ausstreichenden Gesteinstyp abhängigen, mehr oder weniger flächig ablaufenden Subrosion ist punktuell eine selektive Subrosion besonders leicht löslicher Salze am Salzspiegel möglich. Durch die Bildung der kaltzeitlichen Rinne wurde der Prozess am überkippt ausstreichenden Kaliflöz Staßfurt intensiviert, sodass es bis in eine Tiefe von ca. 170 m unterhalb des flächig ausgebildeten Salzspiegels zu Lösungs- und Umwandlungsprozessen kam (auch als vorausseilende Subrosion bezeichnet). Diese selektiv stärker gelösten Kalisalz-Bereiche wurden durch Steinsalzkristallisationen wieder verschlossen.

17.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Wegen der aktuellen Tiefenlage des Salzspiegels bei ca. 250 bis 320 m u. NN ist die heutige Subrosionswirkung als gering zu bewerten. Unter der Annahme, dass auch in Zukunft ein Wechsel von Warm- und Kaltzeiten vorliegt, ist mit einer Subrosionsrate von 0,1 bis 0,2 mm/Jahr zu rechnen. Bei 1 Million Jahren ergäbe sich eine Subrosion von 100 bis 200 m, dadurch würde der Salzspiegel jedoch in so große Tiefen abgesenkt, dass von einer deutlichen Verlangsamung der Subrosion auszugehen ist. Gleichzeitig kämen dann Sedimente entsprechender Mächtigkeit zur Ablagerung und die Mächtigkeit des Deckgebirges würde sich erhöhen, wobei damit einhergehend eine chemische Beeinflussung der lokalen oberflächennahen Grundwasserverhältnisse möglich wäre. Unter Berücksichtigung dieser Einflüsse ist mit einer Gesamtsubrosion von nicht mehr als 50 bis 100 m zu rechnen (Mrugalla 2011).

Die oben genannten Angaben berücksichtigen Effekte durch eiszeitliche Bildungen über dem Salzstock (z. B. Rinnen) solange diese indirekt subrosiv wirken. Direkte Einflüsse einer evtl. Rinne durch Erosion ist Teil des FEP Glaziale Rinnenbildung. Eine erneute selektive Ablaugung leichtlöslicher Minerale ist nur dann möglich, wenn bisher unbeeinflusste Bereiche des überkippten Kaliflözes durch tiefreichende Erosion zugänglich gemacht würden. In einem solchen Fall entstünde eine Wegsamkeit, die etwa 150 m unter den Salzspiegel reichen würde. Diese Wegsamkeit würde in der Folge wieder verheilen, so dass wieder intaktes Wirtsgestein entsteht. Es besteht kein Einfluss durch die Subrosion auf das Nahfeld, da das Wirtsgestein in ausreichender Mächtigkeit (ca. 600 m) vorhanden ist. Die oberen Dichtelemente der Schachtverschlüsse erstrecken sich auch in den Bereich des Salzspiegels, so dass Auswirkungen auf die Dichtelemente (z. B. chemisch, Stabilitätsverlust) durch die Subrosion nicht ausgeschlossen werden können.

17.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

17.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

17.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

17.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein, Schachtverschluss (oberes Dichtelement)

17.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Subrosion ist auf Grund der geologisch/hydrogeologischen Situation am Endlagerstandort im Nachweiszeitraum wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Mit Ausnahme des Nahfeldes, das wegen seiner Tiefenlage von der am Salzspiegel ablaufenden Subrosion nicht betroffen ist, wird das FEP für alle anderen Teilsysteme berücksichtigt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Subrosion wirkt im geologischen Zeitrahmen in unterschiedlichem Ausmaß und in Abhängigkeit von der klimatischen Entwicklung direkt auf die Initial-Barrieren Wirtsgestein und Schachtverschlüsse (oberes Dichtelement) ein.

17.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Diapirismus

Auflösung und Ausfällung

Wirtsgestein

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Diapirismus: Durch das Aufdringen des Salzstocks gelangt der Salzspiegel in Bereiche mit einer höheren Grundwasserdynamik und Bereiche mit Frischwasservorkommen.

Auflösung und Ausfällung: Auflösung und Ausfällung bestimmen die Subrosionsraten.

Wirtsgestein: Die unterschiedlichen Salzgesteine des Wirtsgesteins weisen unterschiedliche Löslichkeiten auf und beeinflussen so den Umfang der Subrosion.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Bewegung des Grundwassers am Standort ermöglicht die Zufuhr von Frischwasser an den Salzspiegel und damit eine Subrosion.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die gelöste Menge an Salzen im Grundwasser bestimmt das weitere Lösungsvermögen des Grundwassers.

Bemerkungen:

Das Lösungsverhalten (FEP Auflösung und Ausfällung) der Salzminerale ist von der Temperatur abhängig. Wärmeproduktion wirkt indirekt über das FEP Auflösung und Ausfällung.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Schachtverschlüsse

Wirtsgestein

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Begründungen:

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge: Beim Einsturz subrosionsbedingter Hohlräume oder der Bildung von Subrosionssenken ist lokal die Bildung von Störungen möglich.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Am Salzspiegel vorhandene Klüfte könnten durch die Subrosion verbreitert werden.

Wirtsgestein: Das Wirtsgestein wird durch die Subrosion beeinflusst, indem es abgetragen wird.

Schachtverschlüsse: Wird der Salzspiegel durch die Subrosion vertieft, könnten die oberen Dichtelemente der Schachtverschlüsse freigelegt und erodiert werden.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die hydrochemischen Verhältnisse beeinflussen die Subrosion und werden umgekehrt beeinflusst (Wechselwirkung).

Topografie: Subrosion kann eine lokale Absenkung der Erdoberfläche bewirken.

17.11 Offene Fragen

Keine.

17.12 Literaturquellen

Appel, D., Habler, W. (1998): Quantifizierung postholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben durch statistische Auswertung von Bohrerergebnissen. - Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, 38: 7-30; Hannover.

Bornemann, O., Fischbeck, R. (1986): Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben. - Z. dt. geol. Ges., 137: 71-83; Hannover.

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen geologischen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73; 211 S.; Hannover.

Boulton, G. S., Gustafson, G., Schelkes, K., Casanova, J., Moren, L. (2001): Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (Pagepa). Final report. - Office for Official Publications of the European Communities. Nuclear Science and Technology, EUR 19784 EN: 147 S.; Luxemburg.

Klinge, H. (1994): Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben und seiner Randsenken. Projektgebiet Gorleben-Süd. - BGR, Ber., 111699: 234 S.; Hannover.

Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71: 147 S.; Hannover.

Klinge, H., Vogel, P., Boehme, J., Ludwig, R., Schelkes, K. (1998): Freshwater/saltwater distribution in the aquifer system above the Gorleben salt dome and special aspects of simulation of brine transport. (In: Proc. DISTEC '98, International Conference on Radioactive Waste Disposal, Hamburg, Sept. 9-11, 1998). - Kerntechn. Ges.: 133-138; Hamburg.

Klinge, H., Rübel, A., Suckow, A., Beushausen, M. (2000): Isotope hydrogeological studies on the salt water flow above the Gorleben salt dome. (In: Proc. 16th SWIM, Miedzyzdroje-Wolin Island 2000). - Nicholas Copernicus University, Vol. 80: 95-102; Torun/Polen.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72: 201 S.; Hannover.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Zirngast, M. (1990): Begrenzung und Volumen des Salzstocks Gorleben. - BGR, unveröffentl. Ber., 106565: 8 S.; Hannover.

Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht. - BGR, Ber.: 570 S.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Duphorn, K. (1980): Kartierbericht Gorleben, Erläuterungen zur geologischen Übersichtskarte 1 : 25 000, zu den geologischen Spezialkarten 1 : 5 000 und zu den Strukturkarten 1 : 10 000, 1 : 25 000, 1: 50 000. - Bericht Univers. Kiel; Kiel.

Duphorn, K. (1986): Das subrosive Sicherheitsrisiko bei der geplanten Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Salzstock Gorleben aus quartärgeologischer Sicht. - Z. dt. geol. Ges., 137: 105 -120; Hannover.

Duphorn, K. (1987): Die quartäre Subrosion am Endlagersalzstock Gorleben. Eine vergleichende Betrachtung der Arbeitsmethoden, Bohrbefunde, Deutungen und sicherheitsgeologischen Bewertungen. - Meyniana, 39: 41-69; Kiel.

Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U., Schröder, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben, Abschl.-Bericht Univ. Kiel. - Univ. Kiel (PTB-Bestell-Nr. 73760; BGR-Archiv-Nr. 103 714): 265 S.; Kiel.

Keller, S. (1990): Das Ablaugungsverhalten der Salzstöcke in NW-Deutschland (Abschl.-Ber. des BMFT-Förderungsvorhabens KWA 5801 9 'Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock', Teilprojekt III). - BGR, unveröffentl. Ber., 106570.; Hannover.

Schröder, P. (1988): Aufbau und Untergliederung des Niederterrassenkörpers der Untertelbe. - Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, 27: 119 S.; Hannover.

Struckmeyer, K., Keller, S. (1990): Ergänzende Untersuchungen und Ergebnisse zum Bericht "Das Ablaugungsverhalten der Salzstöcke in NW-Deutschland". Abschlußbericht des Fördervorhabens KWA 5801 9 "Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock", Teilprojekt III. - BGR, Ber., 106872: 52 S.; Hannover.

18 Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

18.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als globale klimatische Änderungen werden Änderungen der globalen Temperaturen und Niederschläge bezeichnet.

18.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Als Ursachen für eine globale Klimaänderung kommen terrestrische und extraterrestrische Faktoren (z. B. Klostermann 1988, Bloom 2010) oder menschliche Aktivitäten (IPCC 2007) in Frage. Es werden als auslösende Faktoren diskutiert:

- Änderung der primären Sonneneinstrahlung,
- Änderung der Erdbahnelemente,
- Drift von Kontinenten mit Veränderung der großen Meeresströmungen,
- Gebirgsbildung/Orogenese
- Vulkanismus,
- Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre,
- Größe und Lage der Land-, Wasser- und Eisoberflächen, Änderung der Vegetation,
- Gesteinszusammensetzung und Verwitterung (CO₂-Bindung) und
- Anthropogene Beeinflussung

Man geht von einer Koppelung von verschiedenen Faktoren und einer Verstärkung der Effekte durch Rückkoppelung aus, vor allem über die Albedo. Die primäre Sonneneinstrahlung ist der bei weitem wichtigste Parameter für das Klima der Erde. Geringe Änderungen können drastische Klimawechsel erzeugen. Bereits kurzperiodische Strahlungsänderungen durch den Sonnenfleckenzyklus (z. B. Maunder Minimum, „Kleine Eiszeit“ des 17. u. 18. Jahrhunderts) werden als Klima wirksam eingeschätzt. Neben den Sonnenflecken werden auch andere Einflüsse auf die Menge der auf der Erde einfallenden primären Sonnenstrahlung kontrovers diskutiert. Scherer et al. (2007) ver-

weisen dabei auf den Einfluss von lokalen Änderungen in der interstellaren Materie, die mit Änderungen der kosmischen Strahlung einhergeht (vgl. a. Bahlburg et al. 2004). In welchem Maß die geänderte kosmische Strahlung das Klima beeinflusst, ist jedoch noch ungeklärt (z. B. Ehlers 1994: 5; Bloom 2010).

Die über Jahrtausende verlaufende Drift von Kontinenten in Polbereiche – z. B. die heutige Lage der Antarktis – scheint ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Eiszeitaltern zu sein. Auch die Entstehung von durch Kontinente abgeschlossenen Meeresbereichen in Polnähe – z. B. der heutige Bereich der Arktis – ist ebenso wie die Heraushebung von Erdkrustenteilen in große Höhen durch Gebirgsbildung, z. B. Himalaya mit Tibet, förderlich für die Akkumulation von Schnee und Eis.

Für die Steuerung der Zyklizität innerhalb der Eiszeitalter, der wiederkehrende Wechsel von Kaltzeiten zu Warmzeiten, werden heute allgemein die Erdbahnparameter, Exzentrizität der Erdbahn mit Perioden von 413.000 und ca. 100.000 Jahren, die Schiefe der Ekliptik mit einer Periode von 41.000 Jahren und die Präzessions der Erdachse mit Perioden von 23.000 und 19.000 Jahren verantwortlich gemacht (Milankovitsch-Theorie: Milankovitsch 1998; vgl. Smithson et al. 2008: 175 ff.; Ludwig 2006). Weil die Perioden mit ca. 100.000 und 41.000 Jahren auch im Kaltzeit-Warmzeit-Zyklus dominieren, wird ein enger Zusammenhang angenommen.

Die Dauer eines Kaltzeit(Glazial)-Warmzeit(Interglazial)-Zyklus beträgt im Mittel- und Oberpleistozän etwa 100.000 Jahre. Im Unterpleistozän bis ca. 800.000 Jahre BP herrscht ein kürzerer Zyklus von ca. 20.000/41.000 Jahre vor. Der Beginn einer Kaltzeit ist aber nicht mit dem sofortigen Erreichen tiefster Temperaturen gleichzusetzen. Das Maximum der Abkühlung tritt, wie am Beispiel der Weichsel-Kaltzeit ersichtlich, erst mit einer gewissen Verzögerung am Ende auf, wobei es im Verlaufe der Kaltzeit insbesondere während der frühen Phase zu einem Kalt-Warm-Wechsel von Stadien und Interstadien kommt (z. B. Behre & Lade 1986), die eine Dauer von ca. 10.000 Jahren umfassen können. Anhand der Sauerstoffisotopen-Kurve des GRIP-Eiskerns (GRIP = Greenland Ice Core Programm), die einen Wechsel im globalen Eisvolumen reflektiert, ist ersichtlich, dass diese Phasen von Klimaschwankungen in unterschiedlicher Intensität modifiziert sind. Die Dansgaard-Oeschger-Zyklen im Zeitrahmen eines Milleniums z. B. begründen sich auf kurzfristige Temperaturerhöhungen von 5 bis 15 °C innerhalb weniger Zehnerjahre (SKB 2001: 68 ff.; Fig. A1-1).

Zum Höhepunkt der Weichsel-Kaltzeit (20.000 bis 18.000 Jahre BP) lagen die Januar-Mitteltemperaturen in Mitteleuropa um -28 bis -30 °C, im Juli bei etwa +8 °C und im Jahresmittel bei ca. -12 °C (Lowe & Walker 1997: Fig. 3.17), wobei regional Abweichungen von den Werten möglich waren. Delisle et al. (2007) zeigen Kurven für die Jahresmitteltemperaturen auf Basis von Modellrechnungen, die einen Wert von wa -8° C für diesen Zeitabschnitt verdeutlichen.

Die extrem kalten Stadiale der Kaltzeiten sind ausgesprochen trockene Zeitabschnitte. In der Weichsel-Kaltzeit fielen in Mitteleuropa ca. 500 mm Niederschlag weniger als heute. Die kaltzeitlichen Interstadiale zeichnen sich durch höhere Temperaturen und gemäßigte klimatische Verhältnisse aus.

18.3 Sachlage am Standort

Das heutige globale Klima resultiert aus einer Änderung von Klima bestimmenden Faktoren, die letztlich das Ende der letzten Kaltzeit und den Beginn einer Warmzeit vor etwa 11.500 Jahren verursachten. Daraus entwickelte sich am Standort ein Klima, das nach der Köppen-Geiger-Klassifikation (Lexikon der Geowissenschaften 2001) zur Klimazone Cfb gehört und sich durch ein warmgemäßigtes (C), ganzjährig feuchtes (Cf) Regenklima mit kalten Sommertemperaturen (Cfb; durchschnittliche Temperatur des wärmsten Monats < 22° C) auszeichnet.

18.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Auswirkungen bestehen auf das Deck- und Nebengebirge, obere Elemente der hoch liegenden Schachtbereiche und das Wirtsgestein. Sie werden in den jeweiligen speziellen standortsspezifischen Klima-FEP (FEP Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung) beschrieben. Das Nahfeld und das tiefliegende Streckensystem sind wegen ihrer räumlichen Trennung (> 850 m Tiefe) nicht betroffen. Modellrechnungen zur globalen Klimaentwicklung für die nahe geologische Zukunft machen bei einer natürlichen Entwicklung auf Basis der Werte für die nicht anthropogen beeinflusste Sonneneinstrahlung eine erneute Kaltzeit vom Typ Weichsel wahrscheinlich (Berger & Loutre 1995; Forsström, L. 1999). Nach Gerardi et al. (1999) soll es ab ca. 50.000 Jahren zu einer Abkühlung kommen, die eine erneute Ausbreitung des von Skandinavien ausgehenden Inlandeises ermöglicht. Allerdings soll das Eis der

Weichsel-Kaltzeit entsprechend nur den nördlichsten Bereich Norddeutschlands erreichen.

Sollte eine anthropogen bedingte globale Klimaänderung in der Zukunft mit einer Erhöhung der Jahresmitteltemperaturen Wirklichkeit und der natürliche Zyklus gestört werden (Dow & Downing 2006; Mysak 2006; Loutre & Berger 2000), so ist am Standort in deren Gefolge vermutlich mit höheren Niederschlägen und im Extremfall mit einer Meeresüberflutung durch das Abschmelzen der großen antarktischen und grönländischen Gletscher (vgl. FEP Transgression oder Regression) zu rechnen. Für die nächsten 100 Jahre wird allerdings „nur“ ein Anstieg des Meeresspiegels von maximal ca. 0,59 m (rapide Änderung des Eisflusses vernachlässigt; UBA 2007: Tab. SPM.3; WBGU 2006:36 ff.) angenommen. Rahmsdorf (2007) gibt Werte von 0,5 bis 1,4 m für diesen Zeitraum an. Bis zum Jahr 2300 wird ein Meeresspiegelanstieg von 2,7 bis 5,1 m genannt (Rahmsdorf et al. 2006: Tab. 3.1; 3 °C Begrenzung der globalen Erwärmung). Eine Überflutung des Endlagers während der Betriebsphase auf Grund der globalen Klimaentwicklung und eines möglichen Meeresspiegelanstiegs ist damit nicht zu erwarten.

18.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

18.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

18.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

18.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

18.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Globale klimatische Änderungen sind analog zu den Prozessen während der Vergangenheit im Nachweiszeitraum wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Alle Teilsysteme sind abgesehen vom Nahfeld, das wegen seiner Tiefenlage nicht betroffen ist, zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Beeinträchtigungen auf die Initial-Barrieren ergeben sich nur mittelbar über mehrere Ebenen z. B. FEP Vollständige Inlandvereisung → FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung.

18.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Begründungen:

Die Ursachen für globale klimatische Änderungen werden nicht als eigenständige FEP beschrieben.

Beeinflussende FEP: keine

Begründungen:

Die Ursachen für globale klimatische Änderungen werden nicht als eigenständige FEP beschrieben.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Transgression oder Regression

Permafrost

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Oberflächengewässer

Begründungen:

Transgression oder Regression: Durch Änderung der globalen Temperaturen schmelzen die vorhandenen Inlandeismassen, welches zu einem Anstieg des Meeresspiegels führt.

Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung: Durch eine globale Temperaturniedrigung kann die Bildung von Permafrost verursacht werden und letztlich eine Inlandvereisung entstehen.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Oberflächengewässer: Durch globale klimatische Änderungen (Niederschlag, Temperatur) werden die Oberflächengewässer (veränderte Wasserführung, etc.) und das hydraulische Potential (GW-Neubildung) beeinflusst.

18.11 Offene Fragen

Keine.

18.12 Literaturquellen

Bahlburg, H., Breitzkreuz, C. (2004): Grundlagen der Geologie. - Elsevier (Spektrum Akad. Verl.), 2. Aufl.: 4 03 S.; München.

Behre, K.-E., Lade, U. (1986): Eine Folge von Eem und 4 Weichsel-Interstadialen in Oerel/Niedersachsen und ihr Vegetationsverlauf. - Eiszeitalter u. Gegenwart, 36: 11-36; Hannover.

Berger, A., Loutre, M.-F. (1995): The Climate of the next 100,000 Years.- (In: Beaudoin, B.; Godefroy, P., Mouroux, B. (eds.): Actes du Colloque GEOPROSPECTIVE, 18-19 April 1994). - UNESCO: 69-76; Paris.

Bloom, A. J. (2010): Global climate change: convergence of disciplines. Capt. 3: Causes of climate. - Sinauer Associates, 1. Aufl.: 45-74; Sunderland, MA/USA.

Dow, K., Downing, T. E. (2006): The Atlas of Climate Change. Mapping the world's greatest challenge.- University of California Press: 112 S.; Berkeley/USA.

Edwards, N. (2008): A Habitable Planet. (In: Cockell, C. (ed.): An Introduction to the Earth-Life System). - Cambridge University Press, 1st co-published edition, capt. 1: 1-59; Cambridge/U.K.

Ehlers, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. - Ferdinand Enke Verlag, 1. Aufl.: 358 S.; Stuttgart.

Forsström, L. (1999): Future glaciation in Fennoscandia. - Posiva OY, POSIVA, 99-30; Helsinki.

Gerardi, J., Wildenborg, A.B.F. (1999): Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. - BGR-Ber., 144 S.; Hannover.

IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. (In: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Hanson, C. E., Van Der Linden, P. J. (eds.): Klimaänderung 2007: Auswirkungen, Anpassung, Verwundbarkeiten. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)). - Cambridge University Press, Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle, Bern/Wien/Berlin: 39 S.; Cambridge/ U.K.

Klostermann, J. (1988): Die Entstehung von Kaltzeiten und Eiszeitaltern. - Natur am Niederrhein (N. F.), 3. Jahrgang, Heft 2: 37-45; Krefeld.

Lexikon der Geowissenschaften (2001): Instr-Nor. - Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 3: 486 S.; Berlin.

Ludwig, K.-H. (2006): Eine kurze Geschichte des Klimas. Von der Entstehung der Erde bis heute. - Verl. C. H. Beck, 1. Aufl.: 216 S.; München.

Loutre, M.-F., Berger, A. (2000): Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacial?- Climatic Change, 46: 61-90; Amsterdam/Netherlands.

Lowe, Walker, M. J. C. (1997): Reconstructing Quaternary Environments. - Longman, 2. Aufl.: 446 S.; Harlow/U. K.

Milankovitsch, M. (1998): Canon of Insolation and the Ice-Age Problem. - Zavod za udzbenike i nastavna sredstva, (reprint 1st ed.): 634 S.; Beograd.

Mysak, L. A. (2006): Glacial Inceptions: Past and Future (Alfred Wegener Medal Lecture). - Geophysical Research Abstracts, Vol. 8: 11031; Strasbourg/European Geosciences Union.

Rahmstorf, S. (2007): A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. - Science, 315, 5810: 368-370; Washington.

Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J. (2006): Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie. - WISSEN, 3. Aufl.: 144 S.; München (C. H. Beck).

Scherer, K., Fichtner, H. (2007): Das Klima aus dem All. - Physik Journal, Bd. 6, Nr. 3: 59-63; Weinheim (Wiley-VCH Verlag).

Smithson, P., Addison, K., Atkinson, K. (2008): Fundamentals of the Physical Environment. - Routledge, 4. Aufl.: 776 S.; London/U.K.

SKB (2001): Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), TR-99-05; Stockholm.

UBA (2007): Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. - Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC); Umweltbundesamt (UBA)/Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): 70 S.; Berlin.

WBGU (2006): Die Zukunft der Meere - zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): 114 S.; Berlin.

Weiterführende Literatur:

Becker, A. (2003): Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen potentiellen Strahlenexposition unter Berücksichtigung des Einflusses des Klimas. - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz BMU - 2003-623; Bonn.

BIOCLIM (2001): Global climatic features over the next million years and recommendations for specific situations to be considered. Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal, Deliverable D3. - Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA), EC-Contract: FIKW-CT-2000-00024; Paris.

Boulton, G. S., Gustafson, G., Schelkes, K., Casanova, J., Moren, L. (2001): Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (PAGEPA). Final report. - Office for Official Publications of the European Communities. Nuclear Science and Technology, EUR 19784 EN; Luxemburg.

Boulton, G. S., Payne, A. (1992): Reconstructing the past and predicting the future regional components of global change: The case of glaciation in Europe. - Proc. Workshop WC-1 (Waste Disposal and Geology Scientific Perspectives), 29th Int. Geol. Congr.; Tokyo/Japan.

Elias, S. A. (ed.) (2007): Encyclopedia of Quaternary Science. - Elsevier, Vol. 1-4: 3365 S.; Amsterdam.

Goodess, C. M., Watkins, S. J., Burgess, P. E., Palutikof, J. P. (1999): Assessing the Long-Term Future Climate of the British Isles in Relation to the Deep Underground Disposal of Radioactive Waste. - NIREX, NIREX Report N/010; Oxfordshire/U.K.

19 Transgression oder Regression (1.3.03.01)

19.1 Definition/Kurzbeschreibung

Transgression/Regression bedeutet eine land-/seewärtige Verlagerung der Küstenlinie, die mit dem Vorrücken und dem Rückzug des Meeres verbunden ist.

19.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Transgressionen oder Regressionen können durch regionale tektonische Absenkung und/oder Epirogenese des Festlandes, durch eustatischen, also weltweit gleichzeitig erfolgenden und kalt-/warmzeitlich verursachten Meeresspiegelabsenkung/-anstieg ausgelöst werden. Die eustatische Meeresspiegelschwankung bedeutet weltweit wirksame Meeresspiegeländerungen, die entweder auf Volumenänderungen der Meeresbecken beruhen oder auf Massenverlagerungen und Ausdehnung des Wassers infolge klimabedingter Veränderungen des Wasserhaushalts. So bewirkte beispielsweise während des letzten Glazials die Bindung des Wassers in Eismassen eine weltweite Meeresspiegelabsenkung von mehr als 100 m. Das völlige Abschmelzen der heutigen Gletscher würde einen Meeresspiegelanstieg um ca. 65 m nach sich ziehen.

Sichtbarer Ausdruck einer Transgression ist die Überlagerung kontinentaler durch flachmarine Sedimente bzw. generell die Überlagerung küstennaher durch jeweils küstenfernere Ablagerungen (deepening upward-Zyklen). Diese diachrone Verschiebung von Faziesgürteln ist sowohl biostratigraphisch als auch mit Hilfe der seismischen Stratigraphie (Sequenzstratigraphie) belegbar.

19.3 Sachlage am Standort

Das heutige Geländere relief in der unmittelbaren Umgebung des Standortes umfasst Höhen zwischen 15 und 76 m ü. NN (Duphorn et al. 1983). Der Standort (Schacht) liegt bei etwa 26 m ü. NN. Die Küstenlinie der Ostsee befindet sich zurzeit in etwa 100 km, diejenige der Nordsee in etwa 190 km Entfernung.

19.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Bei der Überflutung des Standortes in Folge einer Transgression sind durch die erhöhte Auflast des Meerwassers prinzipiell Spannungsänderungen im Wirtsgestein möglich (vgl. FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung). Eine Klimaänderung, die zu einem vollständigen Abschmelzen der Gletscher in den höheren Breiten (Antarktis, Grönland) führt, würde z. B. eine ca. 40 bis 50 m hohe Wassersäule über dem Standort nach sich ziehen.

Eine Regression findet während einer erneuten Kaltzeit statt, die mit dem Abschmelzen der großen Inlandgletscher in eine Transgression übergeht. Trocken gefallene Meeresbereiche gefrieren unter Permafrostbedingungen. Ein Abbau von Permafrost ist durch eine Transgression vorstellbar, wenn im Zuge einer raschen Gletscherschmelze der Meeresspiegel steigt. Während die überfluteten Gebiete bereits frei von Permafrost sind, bleibt der Permafrost in den umliegenden Festlandsgebieten bis zum Beginn dauerhafter warmzeitlicher Verhältnisse erhalten.

Durch eine Absenkung (Regression) des Meeresspiegels wird das Erosionsniveau tiefer gelegt und die Flüsse schneiden sich besonders in Küstennähe bei großen Reliefunterschieden tiefer in die Landschaft ein. Im Falle des Standortes sind solche extremen Veränderungen im Relief nicht zu erwarten, da bei einer Meeresspiegelabsenkung das nur flache Nordseebecken "trockenfällt". Das heutige Gefälle des Hauptvorfluters Elbe erhöht sich durch die Verlängerung des Fließweges nicht wesentlich (vgl. BGR 1984:5-9). Eine stärkere Erosionsleistung der Elbe und ihrer Nebenflüsse mit einer einhergehenden möglichen Reduzierung der Deckgebirgsschichten über dem Salzstock ist daher nicht anzunehmen.

Unter der Annahme, dass sich das Gebiet um den Standort in der nächsten Million Jahre absenkt, wird in Abhängigkeit von der Absenkungsintensität eine Transgression im Bereich des Elbetals möglich sein (vgl. FEP Senkung der Erdkruste).

Durch eine Anhebung des Meeresspiegels und einer Überflutung des Standortes ändern sich die hydrogeologischen Verhältnisse. Das bestehende hydraulische Potential wird abgebaut, und es kommt zu einer Versalzung des Grundwassers. Durch die geänderten Grundwasserverhältnisse werden sich außerdem die Subrosionsraten stark verringern.

19.5 Zeitliche Beschränkung

Ein deutlicher Meeresspiegelanstieg aufgrund einer anthropogen bedingten Erwärmung der Erdatmosphäre könnte schon innerhalb der nächsten 500 bis 1.000 Jahre erfolgen (vgl. FEP Globale klimatische Veränderungen). Danach würde sich erneut eine Abkühlung der Erdatmosphäre einstellen. Ab der Zeit von 10.000 Jahren nach heute wird ohne die Annahme anthropogener Einflüsse für das zukünftige Klima eine Abkühlung prognostiziert, die später in eine neue Kaltzeit einmündet (Gerardi & Wildenborg 1999).

19.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit:

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

19.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

19.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

19.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Transgressionen oder Regressionen sind im Nachweiszeitraum auf Grund der zukünftigen Entwicklung des Klimas wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist für das Deck- und Nebengebirge und wegen seiner geringen Ausprägung (→ FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung) für die übrigen Teilsysteme nicht zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Das FEP wirkt nur schwach und nur indirekt über das FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung auf die Funktion der Initial-Barrieren aufgrund einer erhöhten Auflast durch das Meerwasser (ca. 30 m Wassersäule) ein.

19.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Globale klimatische Veränderungen

Topografie

Begründungen:

Globale klimatische Veränderungen: Durch eine Änderung der globalen Temperaturen kann es zu einem Abschmelzen vorhandener Inlandeismassen, zu einer Volumenzunahme des Meerwassers und damit einhergehend zu einer Transgression kommen. Temperaturerniedrigung führt zur Bildung einer Inlandvereisung, wodurch Wasser auf dem Festland mit der Folge einer Regression gebunden wird.

Topografie: Die Topographie steuert die räumliche Ausbreitung einer Transgression.

Bemerkungen:

"Eiszeit"-FEP (Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung) werden nicht berücksichtigt, da sie nur bestimmte Aspekte der Globalen klimatischen Veränderungen beschreiben. Die FEP Senkung der Erdkruste und Hebung der Erdkruste werden wegen ihrer geringen Ausprägung nicht genannt.

Resultierende FEP:

Erosion

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Erosion: Mit einer Transgression ist die Erosion der Landschaft verbunden.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Höhe der bei einer Transgression sich ergebenden Wassersäule bestimmt die Auflast auf das Wirtsgestein.

Beeinflusste FEP:

Sedimentation

Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Sedimentation: Durch die Erweiterung des Meeresbeckens in Folge einer Transgression können Sedimente verstärkt abgelagert werden.

Deck- und Nebengebirge: Durch eine Transgression kommt es zu einer Umgestaltung der oberen Deck- und Nebengebirgsschichten.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Durch die Überdeckung des Standortes mit Meerwasser werden die hydraulischen und geochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge verändert und in deren Gefolge die Süßwasserzufuhr zum Salzspiegel vermindert oder aufgehoben. Bemerkung: Über die Änderung der hydraulischen und geochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge wird die Frischwasserzufuhr zum Salzspiegel vermindert oder aufgehoben und das FEP wirkt nur indirekt auf die Subrosion.

Bemerkungen:

Das FEP wirkt nur indirekt über veränderte hydrochemische Verhältnisse auf die Subrosion.

19.11 Offene Fragen

Keine.

19.12 Literaturquellen

BGR (1984): Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben (PSE II). BMFT-Forschungsvorhaben KWA 5106 2. Abschlußbericht. - BGR-Bericht, 96817: I bis 5-92; Hannover.

Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U., Schröder, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben, Abschl.-Bericht Univ. Kiel. - Univ. Kiel (PTB-Bestell-Nr. 73760; BGR-Archiv-Nr. 103 714): 265 S.; Kiel.

Gerardi, J., Wildenborg, A. B. F. (1999): Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. -BGR-Ber.: 144 S.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Lexikon der Geowissenschaften. SILC-Z (2002). - Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 5: 488 S.; Berlin.

Elias, S. A. (ed.) (2007): Encyclopedia of Quaternary Science. - Elsevier, Vol. 1-4: 3365 S.; Amsterdam.

20 Permafrost (1.3.04.01)

20.1 Definition/Kurzbeschreibung

Teil einer kaltzeitlichen Entwicklung, die durch Temperaturen im Boden oder Gestein von mindestens zwei Jahren lang unter 0 °C gekennzeichnet ist (vgl. Elias 2007). Abhängig von der Tiefenlage und den Druckverhältnissen ist der Boden dabei gefroren oder enthält Wasser, das die gleichen Tiefentemperaturen aufweist.

20.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Permafrostboden entsteht, wenn die Jahresmitteltemperaturen niedriger als etwa -2 °C sind. Die Mächtigkeit des Permafrostes ist abhängig vom Salzgehalt des Grundwassers, dem geothermischen Wärmefluss, dem Vorhandensein von Oberflächenwasser, von ozeanischen oder kontinentalen Klimaverhältnissen, von der Art der Vegetation, von der Art der Sedimente und von der zeitlichen Dauer niedriger Temperaturen. Vereinfacht sind drei Typen des Permafrostes zu unterscheiden:

- kontinuierlicher Permafrost,
- diskontinuierlicher Permafrost und
- sporadischer Permafrost.

Der bis in große Tiefe reichende kontinuierliche Permafrost ist nur vereinzelt aufgrund besonderer Gegebenheiten beispielsweise unter großen Seen durch wenige aufgetaute Stellen unterbrochen (Talík; Pl.: Talíki). In der diskontinuierlichen Permafrostzone treten Permafrostbereiche grundsätzlich nur stellenweise auf, die von ungefrorenem Boden getrennt sind. Diese Zone schließt sich übergangslos an die des kontinuierlichen Permafrosts an (zur Verbreitung des Permafrosts in Norddeutschland während des Hochglazials siehe Renssen et al. 2003: Fig. 7).

Sporadischer oder auch saisonaler Permafrost ist auf wenige begünstigte Stellen der mittleren Breiten in Gebirgen wie den Alpen beschränkt. Dabei ist der Oberboden bereits im Frühsommer eisfrei, während der Unterboden erst im Hoch- und Spätsommer auftaut. Aufgrund von jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen bildet sich

über dem permanent gefrorenen Boden in den warmen Monaten eine Auftauschicht, die variierende Mächtigkeiten von einigen Metern haben kann.

Kontinuierlicher Permafrost entwickelte sich im Laufe der Weichsel-Kaltzeit aus sporadischem und diskontinuierlichem Permafrost bis zum Beginn des Hochglazials. Der Permafrost wird durch eine Bedeckung mit Inlandeis in der Regel wieder abgebaut. Ein Abbau während Interstadialzeiten zu diskontinuierlichem und sporadischem Permafrost ist ebenfalls möglich (vgl. French 2008; Keller 1998: Abb. 3). Die Permafrostmächtigkeiten werden mit 150 m bis maximal 200 m im Norddeutschen Raum angenommen. Delisle et al. (2007) berechnen Permafrostmächtigkeiten für die letzten 1 bis 2 Millionen Jahre. Die Voraussetzungen für die Entwicklung einer Kaltzeit sind im FEP Globale klimatische Veränderungen geschildert. Gebiete mit kontinuierlichem Permafrost liegen z. B. heute weit im Norden Russlands, Grönlands und Alaskas, oder in großen Höhen von Gebirgen. Bestimmende Faktoren für den sporadischen Permafrost sind die Höhenlage oder die geographische Breite. In Nordgrönland kann diese Schicht nur einen halben Meter betragen.

Mit den drei FEP Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage sowie Vollständige Inlandvereisung wird den Gegebenheiten während einer sich entwickelnden Kaltzeit Rechnung getragen und ein bestimmter Zustand in der kaltzeitlichen Entwicklung beschrieben. Für die Dauer des Zustandes sind spezifische kaltzeitlich bedingte Prozesse und die Lage des Inlandeises in Bezug zum Standort charakteristisch. Sie werden zusammenfassend in den genannten FEP aufgeführt und nicht als eigenständige FEP beschrieben. Ausnahme an dieser Stelle ist das FEP Kryogene Klüfte, das wegen seiner möglichen Einwirkungen auf die Systementwicklung als eigenständiges FEP diskutiert wird.

20.3 Sachlage am Standort

Das mit globalen klimatischen Veränderungen verbundene Entstehen einer Kaltzeit führte zeitlich aufeinander folgend am Standort zur Ausbildung eines sporadischen, diskontinuierlichen und letztlich kontinuierlichen Permafrosts. Sandige Schichten gefrieren schneller als tonige. Unterhalb größerer Gewässerflächen (Seen, Flüsse) blieben ungefrorene Bereiche (Taliki) erhalten. Dies galt z. B. für die Schichten unterhalb der Fließgewässer innerhalb des Elbe-Urstromtales.

Der Prozess der Permafrostbildung ist stark zeitabhängig. Nach Modellrechnungen kann das Gefrieren am Standort in Abhängigkeit von der Art des Sediments ca. 5.000 Jahre, das Auftauen nur ca. 1.000 Jahre dauern (vgl. Delisle 1998). Das Auftreten von kontinuierlichem Permafrost am Standort fiel im Wesentlichen in die Zeit des Hochglazials einer Kaltzeit. Während der Weichsel-Kaltzeit erreichte der kontinuierliche Permafrost im Zeitraum zwischen etwa 30.000 bis 15.000 Jahre BP (BP: vor heute) mehrere Zehner bis etwa zweihundert Meter Mächtigkeit. Die Permafrostmächtigkeiten während früherer Kaltzeiten dürften in ähnlicher Größenordnung vorhanden gewesen sein (vgl. Delisle et al. 2007). Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass auch in der Frühzeit der Kaltzeiten während der unterschiedlichen Stadiale ein kontinuierlicher Permafrost, wenngleich von geringerer Dauer und mit geringerer Mächtigkeit, existierte (vgl. Keller 1998; Renssen et al. 2003).

20.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch den Permafrost werden die Grundwasserverhältnisse nachhaltig beeinflusst. Der Grundwasserfluss findet nur in der sommerlichen Auftauschicht an der Erdoberfläche oder unterhalb des Permafrostes statt. Die Grundwasserneubildung ist in den Gebieten mit kontinuierlichem Permafrost äußerst begrenzt und erfolgt über saisonal beständige hydrothermale Taliki. Grundwasseraustrittsgebiete sind im Wesentlichen auf offene Taliki unterhalb größerer Oberflächengewässer beschränkt. Daneben existieren Grundwasseraustrittsstellen, wo das wärmere Wasser des Untergrundes die Möglichkeit besitzt über hydrothermal bedingte Taliki an die Oberfläche zu gelangen.

Weiterhin reichern sich durch das Gefrieren die im Grundwasser enthaltenen Mineralien in bestimmten Zonen des Permafrostes an (Cryopegs), um bei entsprechenden hydraulischen Voraussetzungen als hochsalinare Wässer in Form von Salzwasser-Quellen zu Tage zu treten (chemische Taliki; vgl. Gascoyne 2000). Die Verbreitung eines kontinuierlichen Permafrostes am Standort beeinflusst in ähnlich extremer Weise die Grundwasserverhältnisse wie ein vordringendes Inlandeis (vgl. FEP Inlandvereisung in randlicher Lage, FEP Vollständige Inlandvereisung). Permafrost hat damit einen Einfluss auf eine etwaige Ausbreitung von Radionukliden im Deck- und Nebengebirge eines Endlagers. Dies gilt in hydraulischer wie auch in geochemischer Hinsicht. Eine Beeinflussung der Subrosion, der Schachtverschlüsse und ihrer Verfüllmaterialien erfolgt durch veränderte Temperaturen (vgl. FEP Thermische Expansion und Kontraktion) oder ein Gefrieren.

Die Entstehung von bestimmten Flusstypen scheint mit der klimatischen Entwicklung einer Kaltzeit und dem Permafrost zusammenzuhängen. Mäandrierende, verwilderte (braided) und anastomosierende Flüsse (vgl. Huddardt et al. 2010: 349) entwickeln sich bei unterschiedlich starkem Permafrost in Abhängigkeit von Fließenergie/Sedimenttransport und Vegetation (Kasse et al. 2003; Vandenberghe 2003). Während vor dem Weichsel-Hochglazial der anastomosierende Flusstyp vorherrscht, findet danach ein Wechsel zu einem braided-river-Typ statt. Permafrost freie Zeiten scheinen sich durch einen mäandrierenden Typ auszuzeichnen. Die verschiedenen Flusstypen erlangen somit als Voraussetzung für die Entstehung von offenen Taliken eine Bedeutung bei der Beurteilung der Grundwasserverhältnisse zu verschiedenen Zeiten einer Kaltzeit.

Das Relief wird durch periglaziale Prozesse (Solifluktion, Eiskeilbildung, etc.) im Laufe der Zeit teilweise modifiziert. Die oberflächennahen Schichten werden umgestaltet, Höhen abgetragen und Erosionsmassen in den Tälern abgelagert. Da die Veränderungen durch periglaziale Prozesse (z. B. Pingos, etc.) lokal zwar stark ausgeprägt sein können, sich an der grundsätzlichen Gliederung von Höhen- und Tallagen aber nichts ändert, dürfte der oberflächliche Wasserabfluss in der Standortregion bis zur Ankunft des Gletschers im Wesentlichen in gleicher Weise wie heute gestaltet sein. Das Elbetal wird die aus Nordosten und Südosten kommenden Oberflächenwässer als tiefstes morphologisches Element des betrachteten Gebietes weiterhin sammeln und zur Nordsee abführen. Die Oberflächenwasserscheiden mit ihren heutigen Lagen bleiben im Wesentlichen erhalten. Die aus klastischen Sedimenten bestehende, heute vorhandene Schichtenfolge des quartären Untergrundes wird durch periglaziale Prozesse an der Oberfläche bzw. in den obersten Metern durch Eiskeilbildung, Brodelböden etc. beeinflusst.

Das Nahfeld und die Strecken im Grubenbereich werden auch zukünftig nicht vom Permafrost betroffen sein, da das Endlager in einer Tiefe von >800 m angelegt werden soll. Mit dem Permafrost ist eine Abkühlung des Gesteins in Tiefen verbunden, die über die Tiefenlage des gefrorenen Bereichs hinausgeht.

Für das Hochglazial der letzten Kaltzeit (Weichsel) werden Jahresmitteltemperaturen an der Oberfläche von ca. -8 bis -10 °C angenommen (Renssen et al. 2003; Delisle et al. 2007).

Nach Bauer (1991) kann die Abkühlung möglicherweise zu kryogenen Klüften im liegenden Salzgestein (vgl. FEP Kryogene Klüfte) führen.

20.5 Zeitliche Beschränkung

Ab der Zeit von 10.000 Jahren nach heute wird für das zukünftige Klima eine Abkühlung prognostiziert, die später in kaltzeitlichen Verhältnissen von einem Ausmaß der letzten Weichsel-Kaltzeit mündet (z. B. Forsström 1999). Ein kontinuierlicher Permafrost könnte sich ab ca. 50.000 Jahre nach heute bis zum Maximum der Kaltzeit entwickeln, wobei Unterbrechungen während wärmerer Zeitabschnitte (Interstadiale) möglich sind. Der natürliche Klimaverlauf wird möglicherweise anthropogen bedingt durch eine Verlängerung des augenblicklichen Interglazials gestört (z. B. Loutre & Berger 2000, Mysak 2006).

20.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

20.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

20.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

20.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Während der Entwicklung einer Kaltzeit ist Permafrost wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP wird für das Deck- u. Nebengebirge berücksichtigt, da mit einem sich entwickelnden Permafrost eine Umgestaltung der hydrogeologischen Verhältnisse verbunden ist. Die Temperaturerniedrigung ist in den beiden Teilsystemen Wirtsgestein sowie Strecken und Schächte zu berücksichtigen.

Beeinträchtigungen Initial-Barrieren: Die Beeinträchtigung (Temperaturerniedrigung) auf die Funktion der Initial-Barrieren Schachtverschluss (oberes Dichtelement) oder Wirtsgestein erfolgt nur über andere FEP (Thermische Expansion und Kontraktion, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung).

20.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Globale klimatische Veränderungen

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Oberflächengewässer

Begründungen:

Globale klimatische Veränderungen: Eine globale Erniedrigung der Jahresmitteltemperaturen infolge globaler klimatischer Veränderungen beeinflusst die Entstehung von Permafrost.

Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung: Permafrost wird durch die Überlagerung von Inlandeis abgebaut.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge, Oberflächengewässer: Die Grundwasserströmung und der Salzgehalt des Grundwassers beeinflussen die Ausbildung des Permafrostes.

Bemerkungen: Nicht aufgenommen wird das FEP Transgression oder Regression, da diese den Permafrost nicht beeinflusst.

Resultierende FEP:

Erosion

Thermische Expansion oder Kontraktion

Begründungen:

Erosion: Frost-Tau-Wechsel führt zur Erosion des Anstehenden (Solifluktion, Frostsprengung, etc.).

Thermische Expansion und Kontraktion: Durch die klimatisch bedingte Temperaturniedrigung erfolgt eine Kontraktion des Wirtsgesteins.

Beeinflusste FEP:

Porosität

Permeabilität

Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Begründungen:

Porosität, Permeabilität: Durch das gefrierende Wasser werden Porenräume versiegelt und die Permeabilität verringert sich.

Deck- und Nebengebirge: Die Schichten des Deck- und Nebengebirges werden durch Brodelböden und Eiskeile strukturell beeinflusst.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Durch den gefrorenen Boden, die Bildung von Taliki und versiegelte Grundwasserneubildungsgebiete ändern sich die Grundwasserströmungsverhältnisse.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Bildung von Cryopegs.

Topografie: Die Topografie wird durch das gefrierende Wasser in den Sedimenten mit der Bildung von z. B. Pingos beeinflusst.

20.11 Offene Fragen

Siehe FEP Bildung kryogener Klüfte.

20.12 Literaturquellen

Delisle, G. (1998): Numerical simulation of permafrost growth and decay. - J. Quaternary Sci., Vol. 13, No. 4: 325-333; Chichester/U.K.

Delisle, G., Grassmann, S., Cramer, B., Messner, J., Winsemann, J. (2007): Estimating episodic permafrost development in northern Germany during the Pleistocene. (In: Hambrey, M. J. et al. (Eds.): Glacial Sedimentary Processes and Products).- Int. Ass. Sedimentologists (IAS), Spec. Publ., 39: 109-119; Oxford/U.K.

Elias, S. A. (ed.) (2007): Encyclopedia of Quaternary Science. - Elsevier, Vol. 1-4: 3365 S.; Amsterdam.

Forsström, L. (1999): Future glaciation in Fennoscandia. - Posiva OY, Posiva 99-30; Helsinki.

French, H. (2008): Recent Contributions to the Study of Past Permafrost. - Permafrost and Periglacial Processes 19: 179-194; Online, DOI: 10.1002/ppp.614 (www.interscience.wiley.com).

Gascoyne, M. (2000): A review of published literature on the effects of permafrost on the hydrogeochemistry of bedrock. - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), R-01-56; Stockholm.

Huddart, D., Stott, T. (2010): *Earth Environments. Past, Present and Future.* - J. Wiley & Sons: 896 S.; Cichester/U.K.

Kasse, C., Vandenberghe, J., Van Huissteden, J., Bohncke, S. J. P. & Bos, J. A. A. (2003): Sensitivity of Weichselian fluvial systems to climate change (Nochten mine, eastern Germany). - *Quaternary Science Reviews*, 22: 2141-2156; Amsterdam.

Keller, S. (1998): Permafrost in der Weichsel-Kaltzeit und Langzeitprognose der hydrogeologischen Entwicklung in der Umgebung von Gorleben/NW-Deutschland. - *Z. angew. Geol.*, 44/2: 111-119; Hannover.

Loutre, M.-F., Berger, A. (2000): Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacial? - *Climatic Change*, 46: 61-90; Amsterdam.

Mysak, L. A. (2006): *Glacial Inceptions: Past and Future (Alfred Wegener Medal Lecture).* - *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8: 11031; Strasbourg.

Renssen, H., Vandenberghe, J. (2003): Investigation of the relationship between permafrost distribution in NW Europe and extensive winter sea-ice cover in the North Atlantic Ocean during the cold phases of the Last Glaciation. - *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, Nos. 2-4: 209-223; Amsterdam.

Vandenberghe, J. (2003): Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. - *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22: 2053-2060; Amsterdam.

21 Bildung kryogener Klüfte (1.3.04.02)

21.1 Definition/Kurzbeschreibung

Kryogene Klüfte sind vom Salzspiegel ausgehende Trennfugen im Wirtsgestein, die genetisch im Zusammenhang mit Kaltzeiten stehen und vermutlich auf eine Abkühlung und Kontraktion zurückzuführen sind.

21.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Bauer (1991) berichtet über Klüfte in einigen Salzstöcken des hannoverschen Raumes bis ca. 600 m unter Tagesoberfläche, die eine mit zunehmender Teufe abnehmende Häufigkeit besitzen und durch vorwiegend toniges Material sowie durch neugebildete Kluftminerale oder wässrige Lösungen gefüllt sind. Als eine der möglichen Ursachen für ihre Entstehung diskutiert er eine Spannungsänderung durch Abkühlung der Salzstöcke bzw. des Nebengebirges in Folge einer Kaltzeit und die Bildung von Kontraktionsrissen im Salzgestein. Die Klüfte gehen vom Salzspiegel aus, dessen Tiefenlage z. B. bei der Struktur Bokeloh zwischen -90 und -140 m NN beträgt (Holländer 2008). Der Salzstock ist überdeckt von ca. 200 m bis 250 m mächtigen känozoischen Gesteinen. Isotopengeochemische Untersuchungen an Fluideinschlüssen von Delisle & Dumke (1996) lassen die von Bauer (1991) diskutierte glaziale Genese der Klüfte möglich erscheinen.

21.3 Sachlage am Standort

Temperaturbedingte Klüfte entstanden im Topbereich des Salzstockes Gorleben im Gefolge des Schachtabteufens, bei dem das Gefrierverfahren zum Einsatz kam (Bornemann & Mingerzahn 1995; vgl. a. Burghardt et al. 1982). Zusätzlich zu diesen, auf den Gefrierprozess zurückzuführenden Klüften (Ausbildung einer Topfrisszone) wurde mit dem Auffahren des Schachts 2 eine von der üblichen Streichrichtung (SW-NE) abweichende, ca. 59 m vertikale, vom Salzspiegel ausgehende Kluft (Streichen: SE-NW) festgestellt, für deren genetische Deutung folgende zwei mögliche Theorien genannt werden:

1. Kryogene Klufthbildung nach Bauer (1991), elsterzeitliche Bildung, mit zusätzlicher Überprägung durch einen Kontraktionsriss im Gefolge des während des Schacht-abteufens eingesetzten Gefrierverfahrens.
2. Kontraktionsriss, der ausschließlich auf das Gefrierteufen zurückgeführt wird. Weder in den bisher am Standort Gorleben durchgeführten Tiefbohrungen und Schächten noch in den 44 Salzspiegelbohrungen, die den obersten Teil des Salzstocks erschlossen haben, oder im Bereich der Erkundungssohle in 840 m Tiefe wurden bislang kryogene Klüfte im Sinne von Bauer (1991) festgestellt.

21.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die aus der Vergangenheit abgeleiteten Permafrostmächtigkeiten von 150 bis 200 m (vgl. Delisle et al. 2007; French 2008) werden für den norddeutschen Raum auch im Rahmen einer nächsten Kaltzeit zu erwarten sein. Danach wird das im Topbereich des Salzstockes Gorleben im Mittel in ca. -250 m NN Teufe liegende Salzgestein bei zukünftigen Inlandvereisungen nicht gefrieren. Eine Minderung der Temperaturen in dieser Tiefenlage ist aber durch die kaltzeitliche Abkühlung anzunehmen. Da das Deckgebirge als Isolator wirkt und der Wärmefluss im Salzstock einer Abkühlung entgegenwirkt, ist eine starke Kontraktion unwahrscheinlich.

Wenn Spannungsänderungen an der Oberfläche des Salzstocks in Folge der Einlagerung von wärmeerzeugenden Abfällen mit möglichen Klufthbildungen unterstellt werden, so werden solche Klüfte nach etwa 10.000 Jahren wieder verheilt sein, da sich dann das natürliche Wärmefeld wieder einstellt. Eine Summierung beider Prozesse, kryogene Klufthbildung und wärmebedingte Klufthbildung, findet nicht statt.

Der Einlagerungsbereich wird auch zukünftig nicht von kryogenen Klüften bzw. Permafrost betroffen sein, da das Endlager in einer Tiefe von > 800 m angelegt werden soll. Obwohl die Tiefenlage der Salzstockoberfläche und die zu erwartende Abkühlung durch den Permafrost im Bereich des Salzspiegels eine zukünftige Bildung entsprechender Klüfte am Standort unwahrscheinlich erscheinen lassen, wird dieses FEP für den Salzstock Gorleben wegen der zahlreichen offenen Fragen und des bestehenden Untersuchungsbedarfs vorerst als wahrscheinlich eingestuft.

21.5 Zeitliche Beschränkung

Kryogene Klüftbildungen sind auf die im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre zu erwartenden Kaltzeiten beschränkt. Ab der Zeit von 10.000 Jahren nach heute wird für das zukünftige Klima eine Abkühlung prognostiziert, die später in kaltzeitlichen Verhältnissen vom Ausmaß der letzten Weichsel-Kaltzeit mündet (z. B. Forsström 1999). Permafrostverhältnisse mit der Möglichkeit kryogener Klüftbildungen dürften sich bis zum Maximum der nächsten Kaltzeit entwickelt haben. Der natürliche Klimaverlauf kann anthropogen bedingt durch eine Verlängerung des augenblicklichen Interglazials gestört werden (z. B. Loutre & Berger 2000; Mysak 2006).

21.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

21.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

21.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein

21.9 Begründungen:

Eintrittswahrscheinlichkeit: Obwohl die Tiefenlage der Salzstockoberfläche und die zu erwartende Abkühlung durch den Permafrost im Bereich des Salzspiegels eine zukünftige Bildung entsprechender Klüfte am Standort unwahrscheinlich erscheinen lassen, wird dieses FEP für den Salzstock Gorleben wegen der zahlreichen offenen Fragen und des bestehenden Untersuchungsbedarfs vorerst als wahrscheinlich eingestuft.

Wirkung in den Teilsystemen: Trotz des Fehlens eines eindeutigen Nachweises von kryogenen Klüften durch die Erkundungsarbeiten und prinzipiellen Zweifeln an der kaltzeitlich bedingten Genese der von Bauer (1991) beschriebenen „kryogenen Klüfte“ wird das Teilsystem Wirtsgestein auf Grund des vorhandenen Forschungsbedarfs berücksichtigt.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Während der Entwicklung einer Kaltzeit ist Permafrost wahrscheinlich. Die Beeinträchtigung auf die Initial-Barriere Wirtsgestein erfolgt direkt durch die kaltzeitliche Temperaturerniedrigung. Bis zu der erwarteten Verheilung der Klüfte ist eine Beeinträchtigung in Form von erhöhter Permeabilität zu berücksichtigen.

21.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Wirtsgestein, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die kaltzeitliche Abkühlung (Permafrost) bedingt eine Temperaturerniedrigung und abhängig von den Gesteinseigenschaften des Wirtsgesteins eine Spannungsänderung und Spannungsumlagerung innerhalb des Wirtsgesteins.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Permeabilität

Wirtsgestein

Begründungen:

Wirtsgestein: Durch Kluftbildung werden die Eigenschaften des Wirtsgesteins verändert.

Permeabilität: Solange die gebildeten Klüfte offen bleiben, ist die Permeabilität erhöht.

21.11 Offene Fragen

Die von Bauer (1991) beschriebenen Risse bzw. Klüfte müssen mineralogisch-geochemisch untersucht sowie in die struktur- und regionalgeologische Entwicklung der Region eingeordnet werden. Auf der Grundlage dieser Analysenergebnisse erfolgen Aussagen zur Genese der Klüfte und zur Übertragbarkeit auf die Verhältnisse am Standort Gorleben. Ebenso müssen thermo-mechanische Modellrechnungen durchgeführt werden, um die Bildung kryogener Klüfte unter den speziellen Gegebenheiten und der erwarteten zukünftigen Entwicklung am Standort zu untersuchen.

21.12 Literaturquellen

Bauer, G. (1991): Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren? - Zbl. Geol. Paläont., I/4: 1247-1261; Stuttgart.

Bornemann, O., Mingerzahn, G. (1995): Geologie und Hydrogeologie im Bereich der Schachtstandorte: Geologie im Hutgestein und Salinar der Schächte Gorleben. (In: Jessberger, H.L. (ed.): Gefrierschächte Gorleben). - Balkema, 1. Auflage: 21-36; Rotterdam

Burghardt, G.-A., Link, H., Scharf, V., Stoß, K. (1982): Temperaturbedingte Reißbildungen beim Abteufen von Gefrierschächten im Salzgebirge. - Kali und Steinsalz, Bd. 8, H. 9: 294-315; Essen.

Delisle, G., Dumke, I. (1996): Geochemische und geothermische Untersuchungen zur Frage der Existenz von kryogenen Klüften in norddeutschen Salzstöcken. - Z. angew. Geol., 42, 2: 14 9-154; Hannover.

Delisle, G., Grassmann, S., Cramer, B., Messner, J., Winsemann, J. (2007): Estimating episodic permafrost development in northern Germany during the Pleistocene. (In: Hambrey, M. J. et al. (Eds.): Glacial Sedimentary Processes and Products). - Int. Ass. Sedimentologists (IAS), Spec. Publ., 39: 109-119; Oxford/U.K. (Blackwell Publ.).

Forsström, L. (1999): Future glaciation in Fennoscandia. - Posiva OY, POSIVA 99-30; Helsinki.

French, H. (2008): Recent Contributions to the Study of Past Permafrost. - Permafrost and Periglacial Processes 19: 179-194; Online, DOI: 10.1002/ppp.614 (www.interscience.wily.com).

Holländer, R. (2008): Exkursion A4: Geologische Kurzbeschreibung des Kaliwerks Sigmundshall der K+S Kali GmbH, Wunstorf Bokeloh. (In: Tagungsband, Exkursionsführer; 75. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen 2008, 13.-16. Mai 2008, Hannover). - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG): 90-95; Hannover.

Loutre, M.-F., Berger, A. (2000): Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacial? - Climatic Change, 46: 61-90; Amsterdam/Netherlands.

Mysak, L. A. (2006): Glacial Inceptions: Past and Future (Alfred Wegener Medal Lecture). - Geophysical Research Abstracts, Vol. 8: 11031; Strasbourg/European Geosciences Union.

22 Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)

22.1 Definition/Kurzbeschreibung

Im Rahmen einiger der zukünftig zu erwartenden Kaltzeiten kann sich eine Inlandvereisung ausbilden, die sich von Skandinavien ausgehend bis in die norddeutsche Tiefebene vorschiebt, wobei aber das vorrückende Eis den Standort Gorleben nicht überdeckt, sondern der Eisrand in einer geringen Entfernung zum Stehen kommt. Im Vorland und in den randlichen Bereichen unterhalb des Inlandeises herrscht Permafrost.

22.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises wird im skandinavischen Raum, im Bereich der Eisscheide, für die Weichsel-Kaltzeit mit etwa 2.000 m bis 3.000 m angegeben (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung). In den Randbereichen des Inlandeises wie z. B. im nordwestdeutschen Raum betragen die Eismächtigkeiten nur noch einige hundert Meter. Für den Bereich der Rehburger Endmoräne werden 300 – 350 m und für den Außenrand des saalezeitlichen Inlandeises am Südrand der westfälischen Bucht Mächtigkeiten von 130 m bis 170 m bzw. für den Oberweserraum von etwa 200 m genannt (Skupin et al. 2003; Feldmann 2002). Die Eismächtigkeiten nahe dem weichselzeitlichen Gletscherrand dürften einige Zehnermeter nicht übersteigen, wuchsen aber in Richtung des Eisliefergebietes an. Bei Kopenhagen soll das weichselzeitliche Inlandeis aber nur 500 m betragen haben (Ehlers 1994: 14). Andere mit einer Inlandeisüberdeckung verbundene Fakten sind aus der Beschreibung des FEP Vollständige Inlandvereisung ersichtlich.

Mit den drei FEP Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage sowie Vollständige Inlandvereisung wird den Gegebenheiten während einer sich entwickelnden Kaltzeit Rechnung getragen und ein bestimmter Zustand in der kaltzeitlichen Entwicklung beschrieben. Für die Dauer des Zustandes sind spezifische kaltzeitlich bedingte Prozesse und die Lage des Inlandeises in Bezug zum Standort charakteristisch. Sie werden zusammenfassend in den genannten FEP aufgeführt und nicht als eigenständige FEP beschrieben. Ausnahmen sind Prozesse mit möglichen Einwirkungen (z. B. FEP Kryogene Klüfte, Glaziale Rinnenbildung) auf die Barrieren. Die angenommene Situation „Inlandvereisung in randlicher Lage“ zum Standort wird im Verlauf einer kaltzeitlichen Entwicklung wegen der klimagesteuerten Gletscherdynamik normalerweise nur eine

kurze Zeit Bestand haben. Würde sich im norddeutschen Raum eine stabile Eisrandlage über einen längeren Zeitraum einstellen, so wäre dies mit der Bildung von deutlich ausgeprägten Endmoränenwällen von bis zu einigen zehner Metern Höhe verbunden (z. B. Eisrandlagen der Weichselkaltzeit-Stadien). Die Endmoränenwälle blieben bei einem anschließenden vollständigen Rückzug des Inlandeises erhalten. Im Falle eines weiteren Vorrückens würden sie durch das Inlandeis weitgehend erodiert.

22.3 Sachlage am Standort

Während der letzten Kaltzeit (Weichsel) wurde die Landschaft nordöstlich des Standortes durch das Eis überfahren und entsprechend umgestaltet. Am Eisrand entstanden Endmoränenwälle (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung, FEP Sedimentation). Existierende Erhebungen wurden durch das vorrückende Eis eingeebnet und Depressionen zugeschüttet. Der Standort selbst war eisfrei und durch die Entwicklung eines Permafrosts gekennzeichnet. Die nächste zum Standort existierende weichselzeitliche Eisrandlage, welche einen längeren Halt des Gletschers darstellt, befand sich in ca. 55 km Entfernung nordöstlich von Gorleben.

22.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Die Auswirkungen in den eisfreien Gebieten sind im FEP Permafrost berücksichtigt (z. B. Grundwasserverhältnisse, Taliki). Einige der dort beschriebenen Prozesse werden durch die Auswirkungen der Eisrandlage modifiziert. Unter dem Inlandeis findet mit zunehmender Entfernung vom Eisrand ein Abbau des Permafrosts statt. Dadurch ergeben sich neben einer asymmetrischen Auflast über dem Salzstock aus der nur teilweisen Überdeckung auch Temperaturdifferenzen zwischen dem eisfreien Bereich und der Inlandeisbasis. Ausgehend von den in der Literatur genannten Daten (vgl. Allgemeine Informationen und Beispiele) werden für die Eisrandmächtigkeiten Werte von bis zu 350 m geschätzt.

Die Veränderungen der Morphologie bewirken zusammen mit den auf der Oberfläche des Inlandeises anfallenden Schmelzwässern eine Verlagerung der Grundwasserneubildungsgebiete und Wasserscheiden, eine Änderung der Grundwasserfließrichtung und des hydraulischen Gradienten. Innerhalb des Elbetals kann es durch eine Veränderung der Oberflächenwassermengen zu Sedimentakkumulationen oder zu Erosion kommen. Die auf dem Eis gebildeten Schmelzwässer sickern in Abhängigkeit von der

Existenz eines Permafrostes durch Spalten und Risse in den Untergrund oder fließen an der Basis des Inlandeiskörpers ab. Vor dem Eisrand können Schmelzwasserseen entstehen. Solange das Elbetal nicht überfahren wird, erfolgt der Abfluss der Schmelzwässer weiterhin im Bereich des heutigen Elbetals, das auch während einer erneuten Kaltzeit als morphologisch Tiefstes und damit als Vorflutgebiet anzusehen ist. Die Größe der zu erwartenden Wasserflächen und -tiefen reicht zur Bildung von Taliki im Elbetal und unterhalb von Eisstauseen aus.

Da ein zukünftiger Eisvorstoß wiederum aus Norden und Nordosten zu erwarten ist, baut sich das verglichen mit den heutigen Verhältnissen höhere hydraulische Potential im Norden und Nordosten vom Standort auf. Der Grundwasserfluss ist daher, aus nördlichen Richtungen kommend, auf das Elbetal ausgerichtet. Ist der hydraulische Gradient entsprechend hoch, wird eine Grundwasserbewegung initiiert, die auch die Durchströmung des Hutgesteins mit gesteigerten Subrosionsraten (FEP Ausfällung und Auflösung) durch Süßwasserzufuhr am Salzspiegel möglich macht. Modellstudien zur Grundwasserbewegung unter solchen Bedingungen und der Berücksichtigung von Seen im Gletschervorfeld finden sich in Kösters et al. (2000) oder Boulton et al. (2001).

Nach dem Rückzug des Eises bilden sich in den überfahrenen Gebieten wiederum andere Abflusssysteme des Oberflächenwassers, neue Oberflächenwasserscheiden und damit andere Grundwasserverhältnisse aus.

22.5 Zeitliche Beschränkung

Ein kontinuierlicher Permafrost dürfte sich bis zum Maximum einer Kaltzeit entwickelt haben. Ab diesem Zeitpunkt sind für eine Dauer von ca. 10.000 Jahren verschiedene Eisrandlagen und Permafrost im Bereich des Standortes möglich, wobei sich die Auswirkungen des FEP durch die variable Lage des Eisrandes zum Standort zeitlich stark unterscheiden können.

Die natürliche Entwicklung wird möglicherweise anthropogen bedingt durch eine Verlängerung des augenblicklichen Interglazials gestört (z. B. Loutre & Berger 2000; Mysak 2006).

22.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich nicht zu betrachten

22.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

22.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

22.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Im Zuge einer Kaltzeitentwicklung ist ein Zustand wahrscheinlich, bei dem das Inlandeis randlich am Standort verweilt.

Wirkung in den Teilsystemen: Das Teilsystem Deck- u. Nebengebirge muss auf Grund der Gletschertätigkeit und der Ausbildung des Permafrosts und die Teilsysteme Wirtsgestein sowie Strecken und Schächte müssen in Folge der kaltzeitlich bedingten Temperaturenniedrigung berücksichtigt werden.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Nicht zutreffend. Die Einwirkung (Temperaturenniedrigung) auf die Initial-Barrieren Schachtverschluss (obere Dichtelement) oder Wirtsgestein erfolgt nur über andere FEP (Thermische Expansion und Kontraktion; Spannungsänderung und Spannungsumlagerung).

Die im FEP Permafrost aufgeführten Abhängigkeiten werden z. T. auch für das FEP Inlandvereisung in randlicher Lage inhaltlich übernommen und einsortiert. Bemerkung: Die im FEP Vollständige Inlandvereisung angegebenen Abhängigkeiten bezüglich der

Inlandeisauswirkungen sind hier nur mit Einschränkung zu übernehmen, weil der Standort entsprechend der FEP-Definition keine vollständige Eisbedeckung aufweist.

22.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Globale klimatische Veränderungen

Topografie

Oberflächengewässer

Begründungen:

Globale klimatische Veränderungen: Eine globale Erniedrigung der Jahresmitteltemperaturen infolge globaler klimatischer Veränderungen beeinflusst die Entstehung von Permafrost und die Bildung von Inlandeis.

Topografie: Die Fließrichtung des Inlandeises wird durch die Topografie, z. B. durch das Elbetal, beeinflusst.

Oberflächengewässer: Oberflächengewässer beeinflussen die Ausbildung des Permafrosts im Gletschervorland (Taliki).

Bemerkungen:

Eine Beeinflussung durch den Salzgehalt des Grundwassers auf den Permafrost wird im FEP Permafrost berücksichtigt.

Resultierende FEP:

Erosion

Thermische Expansion oder Kontraktion

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Frost-Tau-Wechsel an der Oberfläche und Exaration führen zur Erosion des Anstehenden.

Die klimatisch bedingte Temperaturniedrigung führt zur Kontraktion des Wirtsgesteins und durch die randliche Eisauflast zu einer Spannungsänderung und Spannungsumlagerung im Gebirge.

Beeinflusste FEP:

Sedimentation

Diagenese

Diapirismus

Permafrost

Deck- und Nebengebirge

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Oberflächengewässer

Begründungen:

Sedimentation: Sedimentation wird durch z. B. Solifluktion im Vorfeld des Inlandeises möglich oder durch Transport von Sedimentmaterial durch den Gletscher erfolgen.

Diagenese, Diapirismus: Durch den Überlagerungsdruck des Eises kann es zu einer Kompaktion der Sedimente kommen und vermag evtl. den weiteren Salzaufstieg zu beeinflussen.

Permafrost: Wenn sich das Inlandeis über Gebiete mit Permafrost vorschiebt, kann der Permafrost unterhalb des Eises abgebaut werden.

Deck- und Nebengebirge: Die Schichten des Deck- und Nebengebirges können durch die Gletscherdynamik verändert werden.

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge: Die mit der Auflast des Inlandeises verbundene Beanspruchung der Deck- und Nebengebirgsschichten kann zum Entstehen von Störungen führen.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Grundwasserströmung wird durch ein verändertes hydraulisches Potential auf Grund der im Bereich des Inlandeises anfallenden Schmelzwässer beeinflusst.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Bildung von Cryopogs.

Topografie: Eine Inlandvereisung in randlicher Lage kann zu landschaftsverändernden Endmoränenenwällen führen.

Oberflächengewässer: Oberflächengewässer werden durch Eisrandlagen beeinflusst (Eisstauseen, Änderung von Flussverläufen).

Bemerkungen:

Das Lösungsverhalten der Salzminerale ist u. a. von der Temperatur abhängig. Die kaltzeitlich bedingte Temperaturniedrigung wirkt indirekt über das FEP Auflösung und Ausfällung. Daher ist das FEP Subrosion nicht unter "beeinflusste FEP" aufgeführt.

22.11 Offene Fragen

Keine.

22.12 Literaturquellen

Boulton, G.S., Gustafson, G., Schelkes, K., Casanova, J., Moren, L. (2001): Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (Pagepa). Final report. - Office for Official Publications of the European Communities. Nuclear Science and Technology, EUR 19784 EN: 147 S.; Luxemburg.

Ehlers, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. - Ferdinand Enke Verlag, 1. Aufl.: 358 S.; Stuttgart.

Feldmann, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. - Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: X + 149 S.; Clausthal-Zellerfeld.

Feldmann, L. (2006): The drainage of the European ice sheet at its maximum expansion. - Clausthaler Geowissenschaften, Bd. 5: 143-148.; Clausthal-Zellerfeld.

Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71: 147 S.; Hannover.

Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K. (2000): 2D-Modellierung der paläohydrogeologischen Entwicklung des Grundwassersystems im Elberaum zwischen Burg und Boitzenburg. - BGR-Ber.: 97 S.; Hannover.

Loutre, M.-F., Berger, A. (2000): Future climatic changes: are we entering an exceptionally long interglacial? - Climatic Change, 46: 61-90; Amsterdam.

Mysak, L.A. (2006): Glacial Inceptions: Past and Future (Alfred Wegener Medal Lecture). - Geophysical Research Abstracts, Vol. 8: S. 11031; Strasbourg.

Skupin, K., Speetzen, E., Zandstra, J.G. (2003): Die Eiszeit in Nordost-Westfalen und angrenzenden Gebieten Niedersachsens. Elster- und saalezeitliche Ablagerungen und ihre kristallinen Leitgeschiebegesellschaften. - Geol. Dienst Nordrhein-Westfalen: 95 S.; Krefeld.

Weiterführende Literatur:

Elias, S.A. (ed.) (2007): Encyclopedia of Quaternary Science. - Elsevier, Vol. 1-4: 3365 S.; Amsterdam.

23 Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

23.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bei einer zukünftigen deutlichen Verringerung der Jahresmitteltemperaturen kann es zur Ausbildung einer neuen Kaltzeit kommen, in der Teile der Erdoberfläche durch eine mächtige Inlandvereisung bedeckt sind. Die Inlandvereisung wird wie während der vergangenen Kaltzeiten von Skandinavien ausgehen, nach Süden vorrücken und den Standort vollständig überdecken.

23.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises wird im skandinavischen Raum, im Bereich der Eisscheide, für die Weichsel-Kaltzeit mit etwa 2.000 bis 3.000 m (z. B. Aseev 1968; Siegert et al. 2004) angegeben. Ältere Kaltzeiten dürften in Skandinavien eine höhere Mächtigkeit aufgewiesen haben. In den Randbereichen des Inlandeises wie z. B. im nordwestdeutschen Raum betragen die Eismächtigkeiten nur noch einige hundert Meter (s. FEP Inlandvereisung in randlicher Lage).

Die verglichen mit Skandinavien geringe Eisauflast in Norddeutschland verursachte nur eine entsprechend unbedeutende Krustendeformation (vgl. Thome 1998: 53 ff.), deren Auswirkungen geologisch nicht nachzuweisen sind (vgl. FEP Krustendeformation). Die Auflast und Bewegung des Inlandeises bewirkte aber eine zu Lagerungsstörungen führende Eistektonik mit Verschuppungen, Störungen, etc. Gestörte Lagerungsverhältnisse sind in Norddeutschland nicht nur vom Standort (100 bis 150 m: BMFT 1981: 234; Duphorn 1983), sondern auch von verschiedenen anderen Stellen bekannt, die eine Überdeckung mit Inlandeis erfuhren (Eissmann 1987; Hannemann 1995). Sie können bis in Tiefen von 200 bis 300 m reichen.

Gletscherschurf (Exaration) oder an das Vorhandensein einer vollständigen Inlandvereisung gebundene Prozesse (z. B. Rinnenbildungen; s. FEP Glaziale Rinnenbildung) bewirken erhebliche Erosionsleistungen. Eine Erosion von Lockermaterialien durch Exaration wird lokal bis zu 100 m Tiefe bzw. von einigen Metern Festgestein ermöglicht. Dadurch anfallende Materialmassen können auf Flächen von bis zu 100 km² und etwa 200 m hoch aufgetürmt werden (Aber & Ber 2007: Tab. 1-3). Die Gletschermächtigkeit, die Mobilität des Eises, Druck und Temperaturen an der Eisbasis sowie die Ge-

ländeform sind dabei wichtige steuernde Faktoren. Aus Skupin et al. (2003: 72 ff.) ist zu entnehmen, dass nach Berechnungen der Fließgeschwindigkeiten in Eisschilden für den zentralen Teil einer fließenden Eismasse Werte von 15 bis 40 m pro Jahr, für die Randbereiche Geschwindigkeiten von über 100 bis 600 m pro Jahr anzunehmen sind. Für das Inlandeis der letzten Kaltzeit (Weichsel-Zeit) werden im norddeutschen Vereisungsgebiet Fließgeschwindigkeiten zwischen 75 m und 150 m pro Jahr angegeben. Die Randbereiche des Inlandeises der Saale-Kaltzeit weisen die mittlere Vorstoßgeschwindigkeit von etwa 200 m pro Jahr auf. Diese höhere Geschwindigkeit lässt sich aus der im Vergleich zum Weichsel-Eis größeren Mächtigkeit der saalezeitlichen Eisschilde ableiten. Mit der Annäherung des Eises an die Mittelgebirge bildeten sich zwischen dem Eisrand und den Höhenzügen ausgedehnte Stauseen (vgl. Thome 1998). Auch nördlich des Wiehengebirges wird ein derartiger Stausee vermutet, in dem sich das Schmelzwasser des Inlandeises und die Wassermengen der von Süden kommenden Flüsse sammelten. Beim Überfahren dieser Stauseen hat die Fließgeschwindigkeit des Eises sehr wahrscheinlich stark zugenommen. Vergleichbare Verhältnisse lagen im Bereich südlich des Wiehen- und Wesergebirges vor, in dem sich der so genannte Rintelner Eisstausee gebildet hatte. Dort dürfte die Fließgeschwindigkeit wegen des Auftriebs der Eismasse und des Aufschwimmens der randlichen Zonen des Eises maximale Werte von 500 bis 600 m pro Jahr erreicht haben. Das die Eismasse in einem gewissen Grad vom Untergrund entkoppelnde Wasser wirkte wie ein Schmiermittel. Es setzte die Reibungs- und Scherwiderstände herab und führte damit zu einer deutlich schnelleren Bewegung des Eises. Bei einer Fließgeschwindigkeit von 500 m pro Jahr hätte der Porta-Gletscher auf seinem Vorstoß nach Osten – das Wesertal aufwärts bis in die Gegend von Hameln – etwa 60 Jahre benötigt. Dieser Wert stimmt in der Größenordnung gut mit der vermuteten Dauer der ersten Phase des Rintelner Eisstausees überein.

Während der Elster-Kaltzeit erreichte der maximale aus dem Norden kommende Gletschervorstoß die deutschen Mittelgebirge und erstreckte sich in Mittel- und Ostdeutschland bis in die Regionen um Erfurt und Dresden. Im westlichen Teil Norddeutschlands lagen die äußersten Eisrandlagen im Düsseldorfer und Dortmunder Raum. Eine ähnliche Ausdehnung hatte das Inlandeis der Saale-Kaltzeit. Dagegen bedeckte die maximale Ausdehnung der letzten Kaltzeit (Weichsel) mit ihrer südlichsten Eisrandlage nur die Gebiete nördlich der Elbe.

Bei einer erneuten Kaltzeit, die zur Ausbreitung einer Inlandvereisung auf dem europäischen Festland führt, werden große Mengen von Wasser gebunden (vgl. FEP Trans-

gression oder Regression). Dadurch sinkt der Meeresspiegel in Abhängigkeit vom Ausmaß der Inlandvereisung um mehrere Zehnermeter bis über 100 m ab. Mit den drei FEP Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage sowie Vollständige Inlandvereisung wird den Gegebenheiten während einer sich entwickelnden Kaltzeit Rechnung getragen und ein bestimmter Zustand in der kaltzeitlichen Entwicklung beschrieben. Für die Dauer des Zustandes sind spezifische kaltzeitlich bedingte Prozesse und die Lage des Inlandeises in Bezug zum Standort charakteristisch. Sie werden zusammenfassend in den genannten FEP aufgeführt und nicht als eigenständige FEP beschrieben. Ausnahmen sind Prozesse mit möglichen Einwirkungen auf die Barrieren (z. B. FEP Glaziale Rinnenbildung).

23.3 Sachlage am Standort

Am Standort sind die Sedimente der letzten drei großen Kaltzeiten (Elster, Saale und Weichsel) und den dazwischen liegenden Ablagerungen der Warmzeiten (Holstein, Eem) mit z. T. großen Mächtigkeiten vertreten (Köthe et al. 2003, Zirngast et al. 2004; verkürzte Zusammenfassung siehe ISIBEL, geol. Referenzmodell von Keller 2007). Ältere kalt- und warmzeitliche Sedimente sind nur in Relikten erhalten. Die Füllungen der während der Elster-Kaltzeit entstandenen Rinnen liegen an einigen Stellen direkt auf dem Salzstock auf (vgl. FEP Glaziale Rinnenbildung). Der Tiefgang von Lagerungsstörungen, die durch das vorrückende Inlandeis verursacht wurden, erreichte während der vergangenen Kaltzeiten im Gebiet des Standortes ca. 100 bis 150 m. Der Höhbeck stellt ein Beispiel für Gebiete mit von der Vereisung verursachten Lagerungsstörungen dar (Duphorn et al. 1983). Nach Feldmann (2006: Fig. 1) bzw. Aseev (1968: Fig. 2) sind für den Bereich des Standortes Eismächtigkeiten von etwa 700 bis 1500 m für die Zeit der saalezeitlichen Maximalvereisung möglich gewesen. Höhere Mächtigkeiten werden als unwahrscheinlich eingeschätzt, da z. B. eine Deformation der Erdkruste durch die Gletscherauflast und damit einhergehend eine Überflutung im nördlichen Bereich Deutschlands geologisch nicht nachgewiesen werden konnte (vgl. a. Diskussion der Inlandeismächtigkeit bei Klostermann 1999: 43).

23.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Für die weitere geologische Zukunft ist mit einer Überföhrung durch Inlandeis zu rechnen. Die zukünftigen Eismächtigkeiten können aus den Gegebenheiten der geologischen Vergangenheit abgeleitet werden. In zukünftigen Kaltzeitabschnitten dürften die

Eismächtigkeiten mit bis zu 1.500 m ähnliche Beträge annehmen bzw. in Randbereichen des Inlandeises einige hundert Meter nicht überschreiten.

Durch eine erneute Eisüberfahrung des Standortes werden oberflächennahe Schichten wie in der Vergangenheit erodiert (Exaration) und/oder eistektonisch gestört. Beide Möglichkeiten beinhalten eine Destruktion bestehender Lagerungsverhältnisse, die zu einer Zunahme oder Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit der Wasser stauenden und leitenden Schichten führt. Im Extremfall können völlig andersartig zusammengesetzte Sedimentabfolgen im höheren Bereich des Deckgebirges zur Ablagerung kommen. Prinzipiell ist bei einer weiteren Inlandvereisung die Entstehung von glazigen Rinnen denkbar (vgl. FEP Glaziale Rinnenbildung).

In Abhängigkeit von den Eismächtigkeiten werden durch das Eisgewicht die Gesteinsschichten deformiert und die Erdkruste sinkt ein (Menzies 1995: 318). Der Wiederaufstieg der Kruste, sofern eine elastische Reaktion stattfindet, muss um den Einsinkungsbetrag erfolgen. Im Vorland einer Inlandvereisung findet dagegen zunächst eine geringe Aufwärts- und danach eine Absenkbewegung statt (Ahlbom et al. 1991: Fig. 6; Thome 1998: 53 ff.). Hinweise für solch ein Geschehen im Bereich des Standortes sind aus geologischen Daten nicht abzuleiten. Im Zuge dieser Auf- und Abbewegungen könnten theoretisch an unter Spannung stehenden Schwächezonen Erdbeben ausgelöst werden. Solche Schwächezonen sind vom Standort aber nicht bekannt.

Ein erhöhter Überlagerungsdruck durch randliches Inlandeis vermag prinzipiell den Aufstieg eines Salzstocks zu beeinflussen. Die Aufstiegstendenzen dürften aber nur kurze Zeit Bestand und, wenn überhaupt, nur geringe Auswirkungen haben, da eine Inlandvereisung in geologischen Zeitdimensionen betrachtet, nur eine äußerst kurze Erscheinung darstellt. Zudem ist das Staßfurt-Steinsalz aus den Randsenken bereits weitgehend in den Salzstock abgewandert, so dass das für einen spontanen Salzaufstieg benötigte leicht plastisch verformbare Material fehlt (vgl. FEP Diapirismus). Vollständig überdeckendes Inlandeis dürfte dagegen keine Auswirkungen haben (Schnier 1984).

Wie bereits erwähnt, erreichte die maximale Inlandeismächtigkeit am Standort durchschnittlich etwa 700 bis 1.500 m (vgl. Aseev 1968). Wären z. B. die durch die Saale-Kaltzeit mit Eismächtigkeiten eines entsprechenden Betrages hervorgerufenen Auswirkungen größer, so müsste eine deutliche Verstellung der praelster-, elster- und holsteinzeitlichen Schichten in Salzstockrandposition zu beobachten sein. Dies ist aber

nicht nachzuweisen. Es wird daher davon ausgegangen, dass eine erneute Inlandvereisung zeitlich nicht genügend lange wirksam ist, um einen weiteren Salzaufstieg mit den damit verbundenen deutlichen Strukturveränderungen auszulösen. Eine gegenteilige Auffassung wurde von Poblozki (2002) propagiert, der aus der Mächtigkeitzunahme von quartären Randsenkensedimenten einen verstärkten quartärzeitlichen Salzaufstieg für einige Salzstöcke in der nördlichen Altmark ableitete. Die hohen quartären Mächtigkeiten sind aber ursächlich auf das auch dort vorhandene glaziale Rinnensystem zurückzuführen. Die Morphologie erfährt eine vollständige Umgestaltung. Neben den im Gletschervorland äußerst dynamisch ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozessen bewirkt das mit erheblichen Mengen Sedimentfracht beladende, erosiv wirkende Inlandeis, dass die bestehenden Täler zugeschüttet oder die aus Lockermaterialien zusammengesetzten Hügel und Hügelketten eingeebnet werden. Lokal kann es zu Sedimentakkumulationen von erheblicher Mächtigkeit kommen (vgl. FEP Inlandvereisung in randlicher Lage). Die in den anderen kaltzeitlichen FEP (Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage) unterstellte weitere Existenz eines als Vorfluter fungierenden Elbetals ist während einer solchen großflächigen Inlandeisüberdeckung der Landschaft höchst unwahrscheinlich. Nach dem Rückzug der Inlandvereisung werden die Lage der Wasserscheiden oder die der Grundwasserneubildungsgebiete verändert sein.

Mit fortschreitender Dauer der Inlandvereisung und bei großen Eismächtigkeiten von mehreren hundert Metern erfolgt unterhalb des Eises überwiegend ein Permafrostrückgang in Richtung des Gletscherliefergebietes. In Folge dessen ändert sich die hydraulische Durchlässigkeit der Sedimente. Die Fließrichtungen oder Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers bei einer mächtigen Inlandvereisung am Standort lassen sich nicht genau prognostizieren. Es ist aber zu vermuten, dass die generelle Tendenz zu einer Ausrichtung der Fließrichtung hin zum Eisrand besteht.

23.5 Zeitliche Beschränkung

Für die Zukunft werden mehrere Kaltzeiten erwartet, in deren Verlauf es zu einer Überdeckung des Standortes mit Inlandeis kommen könnte.

23.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

23.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

23.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

23.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Im Zuge einer Kaltzeitentwicklung ist ein Zustand wahrscheinlich, bei dem das Inlandeis den Standort vollständig überdeckt.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist für die Teilsysteme Deck- und Nebengebirge sowie Wirtsgestein zu berücksichtigen, da der Aufbau des Deck- und Nebengebirges lokal durch Sedimentakkumulationen (z. B. Endmoränenwälle, eistektonische Aufschuppungen) von einigen Zehnermetern bzw. im Extremfall von mehr als 100 m verändert werden kann, die indirekt über das FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung auf das Wirtsgestein einwirken (vgl. FEP Sedimentation).

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Eine Beeinträchtigung auf die Initial-Barriere Wirtsgestein besteht indirekt über die glaziale Rinnenbildung bzw. Subrosion sowie das FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung.

23.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Globale klimatische Veränderungen

Topografie

Oberflächengewässer

Begründungen:

Globale klimatische Veränderungen: Eine globale Erniedrigung der Jahresmitteltemperaturen kann zusammen mit anderen Klima relevanten Parametern (Niederschlag, Verdunstung, etc.) die Bildung einer Inlandvereisung beeinflussen.

Topografie, Oberflächengewässer: Die Fließrichtung des Eises bestimmt sich aus der Topographie, die Vorschubgeschwindigkeit aus dem Vorhandensein von Oberflächengewässern (→ Auftrieb).

Resultierende FEP:

Erosion

Thermische Expansion oder Kontraktion

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Erosion: Durch das Vordringen des Inlandeises werden Oberflächenschichten erodiert (Exaration).

Thermische Expansion oder Kontraktion: Mit der Inlandeisüberdeckung ist ein Abbau des Permafrostes und damit eine Temperaturerhöhung verbunden, woraus das Wirken des FEP Thermische Expansion oder Kontraktion resultiert.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Aufgrund der zusätzlichen Auflast durch das Inlandeis kommt es zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerung im Wirtsgestein.

Bemerkungen:

Das FEP Transgression oder Regression wird als Teilaspekt im FEP Globale klimatische Veränderungen behandelt.

Das FEP Krustendeformation wird wegen seiner geringen Ausprägung am Standort nicht eigens aufgeführt.

Beeinflusste FEP:

Sedimentation

Diagenese

Permafrost

Glaziale Rinnenbildung

Deck- und Nebengebirge

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Oberflächengewässer

Begründungen:

Sedimentation: Sedimentation findet z. B. durch die Ablagerung von Grundmoränen statt.

Diagenese: Durch die Auflast des Eises wird die Kompaktion der Sedimente beeinflusst.

Permafrost: Nach einer Überfahung durch Inlandeis kann es zum Abbau des Permafrosts unterhalb des Inlandeises kommen.

Glaziale Rinnenbildung: Glaziale Rinnenbildungen sind an die Existenz einer Inlandvereisung gebunden.

Deck- und Nebengebirge: Zusammensetzung und Struktur des Deck- und Nebengebirges ändern sich durch eine vollständige Inlandeisüberdeckung.

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge: Die Bildung von Störungen und Störungszonen ist durch den Gletschervorschub möglich.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Änderungen ergeben sich durch die Gletscherdynamik, indem Schmelzwasser das hydraulische Potential beeinflusst.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Durch den Abbau von Permafrost unterhalb des Inlandeises werden vorhandene Cryopegs abgebaut.

Topografie, Oberflächengewässer: Topografie und Oberflächengewässer werden durch das vorrückende Inlandeis nachhaltig umgestaltet.

Bemerkungen:

Wegen der Tiefenlage des Salzstocks gibt es keine direkte Beeinflussung des FEP Wirtsgestein.

Über die Änderung der hydraulischen und geochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge wird die Süßwasserzufuhr zum Salzspiegel vermindert oder aufgehoben und das FEP wirkt nur indirekt auf die Subrosion.

23.11 Offene Fragen

Keine.

23.12 Literaturquellen

Aber, J.S., Ber, A. (2007): Glaciotectonism. - Development in Quaternary Sciences, Vol. 6: 246 S.; Amsterdam.

Ahlbom, K., Pjkäs, T., Ericsson, L.O. (1991): SKB/TVO Ice Age Scenario. - Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, YJT- 91-19; Helsinki.

Aseev, A.A. (1968): Dynamik und geomorphologische Wirkung der europäischen Eisschilde. - Petermanns geogr. Mitt., 112: 112-115; Gotha.

Benda, L. (Hrsg.) (1995): Das Quartär Deutschlands . - 1. Aufl.: 408 S.; Berlin (Gebrüder Bornträger).

Berger, A., Loutre, M.-F. (1995): The Climate of the next 100,000 Years. (In: Beaudoin, B., Godefroy, P., Mouroux, B. (Eds.): Actes du Colloque GEOPROSPECTIVE, 18-19 April 1994). - UNESCO: 69-76; Paris.

BMFT (1981): Entsorgung. Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben. Bericht von einer Informationsveranstaltung im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung (15. und 16. Mai 1981 in Lüchow, Gildehaus). - Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT): 563 S.; Bonn.

Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U., Schröder, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben, Abschl.-Bericht Univ. Kiel. - Univ. Kiel (PTB Bestell-Nr. 73760; BGR-Archiv-Nr. 103 714): 265 S.; Kiel.

Eissmann, L. (1987): Lagerungsstörungen im Lockergebirge. Exogene und endogene Tektonik im Lockergebirge des nördlichen Mitteleuropa. - Geophys. u. Geol., Veröff. der KMU Leipzig, Bd. III, 4: 7-77; Berlin.

Feldmann, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. - Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: X + 149 S.; Clausthal-Zellerfeld.

Feldmann, L. (2006): The drainage of the European ice sheet at its maximum expansion. - Clausthaler Geowissenschaften, Bd. 5: 143-148.; Clausthal-Zellerfeld.

Forsström, L. (1999): Future glaciation in Fennoscandia. - Posiva OY, Posiva, 99-30: 31 S.; Helsinki.

Hannemann, M. (1995): Intensität und Verbreitung glazigener Lagerungsstörungen im tieferen Quartär und Tertiär. - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 2: 51-59; Kleinmachnow.

Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E., Bakker, M. (2006): Buried valleys - nature and groundwater interests. (In: Kirsch, R., Rumpel, H.-M., Scheer, W., Wiedehold, H. (Hrsg.): Groundwater Resources in Buried Valleys. A Challenge for Geosciences). - GGA (Leibniz Institute for Applied Geosciences): 11-18; Hannover.

Keller, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz. Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz. Beitrag für das Projekt ISIBEL. - BGR, Ber.: 75 S.; Hannover.

Klostermann, J. (1999): Das Klima im Eiszeitalter. - E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1. Aufl.: 284 S.; Stuttgart.

Köthe, A., Zirngast, M., Zwirner, R. (2003): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung, Teil I: Deckgebirge Geologie. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G3411900000. - BGR, Ber.: 255 S.; Hannover.

Menzies, J. (Ed.) (1995): Modern Glacial Environments. Processes, Dynamics and Sediments. - Glacial Environments, Vol. 1: 621 S.; Oxford/U.K.

Piotrowski, J.A. (1994): Tunnel valley formation in northwestern Germany - Geology, mechanisms of formation, and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley. - Sediment. Geol., 89: 107-141; Amsterdam (Elsevier).

Poblozki, B. (2002): Stratigraphie des Quartärs und quartäre Bewegungen an Salzstrukturen in der nördlichen Altmark. - Hallesches Jahrb. Geowiss., B 24: 57-82; Halle.

Schnier, H. (1984): Hauptkapitel 5: Geologische Langzeitprognose. (In: Liedtke, L.: Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben, PSE II. Abschlussbericht). - BGR, Ber. : 5-1 - 5-92; Hannover.

Siegert, M.J., Dowdeswell, J.A. (2004): Numerical reconstructions of the Eurasian Ice Sheet and climate during the Late Weichselian. - Quaternary Science Reviews, 23: 1273-1283; Amsterdam.

Skupin, K., Speetzen, E., Zandstra, J.G. (2003): Die Eiszeit in Nordost-Westfalen und angrenzenden Gebieten Niedersachsens. Elster- und saalezeitliche Ablagerungen und ihre kristallinen Leitgeschiebengesellschaften. - Geol. Dienst Nordrhein-Westfalen: 95 S.; Krefeld.

Thome, K. N. (1998): Einführung in das Quartär. Das Zeitalter der Gletscher. - Springer, 1. Auflage: 287 S.; Berlin.

Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht. - BGR, Ber.: 570 S.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Elias, S.A. (ed.) (2007): Encyclopedia of Quaternary Science. - Elsevier, Vol. 1-4: 3365 S.; Amsterdam.

SKB (2010): Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. - Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), TR-10-49: 328 S.; Stockholm.

Steffen, H., Wu, P. (2011): Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia - A review of data and modeling. - Journal of Geodynamics, 52, 3-4: 169-204; Amsterdam.

Whitehouse, P. (2009): Glacial isostatic adjustment and sea-level change. State of the art report. - Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB; Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co), TR-09-11: 105 S.; Stockholm.

24 Glaziale Rinnenbildung (1.3.05.03)

24.1 Definition/Kurzbeschreibung

Glazigene Rinnen sind hydromechanisch verursachte Erosionsformen unterhalb eines großen Inlandeisschildes.

24.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Kaltzeitliche Rinnenbildungen beruhen auf dem Abfluss großer Wassermengen an der Basis von Gletschern, die durch ihre hohen Transportleistungen auf Grund des hohen hydrostatischen Drucks tiefe Einschnitte in den Untergrund verursachen können. In Norddeutschland sind insbesondere elsterkaltzeitliche und in geringem Maße auch saale- und weichselkaltzeitliche Rinnensysteme vorhanden, die unterhalb (subglazial) des großen skandinavischen Inlandeisschildes entstanden. Die tiefsten Rinnen gehören der Elster-Kaltzeit an. Sie erreichen in Lockergesteinen meist Tiefen zwischen 200 und 300 m im Extremfall bis über 500 m (Hagenower Rinne), Breiten von mehreren Kilometern und Längen bis über hundert Kilometer. Die Rinnenbildungen der jüngeren Kaltzeiten sind dagegen in Norddeutschland seltener und weisen geringere Dimensionen mit Tiefen bis ca. 100 bis 200 m auf. Im Festgestein ist die Tiefenerosion aufgrund von Rinnenbildungen wesentlich geringer. Wie die Beispiele Kreuzbrückenspalte (Schroeder 1995) und Münsterländer Kiessandzug (Thiermann et al. 1970; vgl. a. Keller 2009) belegen, kam es im Muschelkalk bzw. in den Kreidekalken/-mergeln nur zu Erosionsleistungen von ca. 50 m bzw. 30 m.

Die elsterzeitlichen Rinnen haben einen Abstand von einigen Zehner Kilometern und sind generell senkrecht auf den ehemaligen Gletscherrand hin orientiert. Im östlichen Teil Norddeutschlands besitzen sie grob eine nordöstliche, im westlichen Teil eine mehr von Nord nach Süd gerichtete Orientierung. Diese grobe Orientierung wurde möglicherweise durch unterschiedliche Gletschermächtigkeiten in Verbindung mit der Richtung des Gletschervorschubs beeinflusst.

Die Rinnen bilden ein unregelmäßiges Netzwerk aus einer Hauptrinne und davon abgehenden Nebenrinnen, die sich z. T. überschneiden. Ihr Verlauf scheint keinen erkennbaren Gesetzmäßigkeiten zu folgen. Offenbar war die Bildung der Rinnen an beliebigen Stellen möglich. Die jeweilige lokale Morphologie mit Senken und Erhebungen

sowie Art und Permeabilität der Gesteine an der Gletscherbasis mögen das Entstehen einer Rinne initial beeinflusst, nicht aber den weiteren Verlauf gesteuert haben. Ein Zusammenhang zwischen Salzstrukturen und dem Rinnenverlauf besteht nach Hinsch (1979) daher nicht. Es müssen offenbar auch spezielle überregional wirkende Randbedingungen wie z. B. Niederschlagsverhältnisse, mittlere Jahrestemperaturen, Eismächtigkeiten, stabile Eisrandlagen während eines generellen Rückzugstrends und evtl. eine besondere großräumige Oberflächenmorphologie vorhanden gewesen sein, die dazu führten, dass zu den verschiedenen Kaltzeiten der Verlauf und die Ausbildung der Rinnen ganz unterschiedlich ausfielen.

Die elsterzeitlichen Rinnen treten im gesamten norddeutschen Raum auf, enden aber entlang einer Linie von Magdeburg über Hannover bis Osnabrück relativ abrupt und sind südlich dieser Linie in nur bescheidenem Ausmaße und selten zu finden. Ein Grund hierfür ist nicht ersichtlich. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Elster-Eis bis an den Rand der Mittelgebirge vorstieß. Dies hätte während der Rückzugsphase des Eises schon südlich dieser Linie zu Rinnenbildungen führen müssen. Entweder erfolgte der Rückzug des Eises zu rasch, oder die Eismächtigkeit reichte nicht aus, die für die Rinnenbildungen notwendigen hydraulischen Randbedingungen zu schaffen. Kuster & Meyer (1979) vermuten einen Zusammenhang mit dem Vorkommen oberflächennaher oligozäner bis untermiozäner Schluffe und Tone, der aber nicht für die gesamten norddeutschen Rinnenvorkommen oder auch für die Begrenzung der Nordseerinnen (vgl. Huuse et al. 2000) hergestellt werden kann. Vermutlich spiegelt sich in dieser Linie eine Elster-Eisrandlage mit bestimmten für die Entstehung und Ausformung der Rinnen günstigen, bislang nicht bekannten Bedingungen wider. Diese Bedingungen waren offenbar während der Saale-Kaltzeit nicht gegeben, obwohl sie eine ähnliche Verbreitung hatte wie die Elster-Kaltzeit.

Nach Stackebrandt (2009) sollen die Vorkommen von Rinnen eng an die Lage bzw. Ausbildung der mitteleuropäischen Subsidenzzone gebunden sein, die sich durch oberflächennahe, leicht erodierbare Lockersedimente auszeichnet. Das widerspricht ähnlichen Vorkommen in Nordamerika oder im Baltikum, wo sich Rinnen in das Festgestein einschneiden. Zur Rinnengenese liegen bislang keine abschließenden Erklärungen vor, die in der Lage wären, alle zu den Vorkommen vorhandene Geländebefunde und die für die Entstehung der Rinnen notwendigen Voraussetzungen miteinander zu verbinden. Die wichtigsten Theorien zur Rinnengenese sind (vgl. Ehlers 1994; Keller 2010):

- Entstehung durch fluviale Prozesse
- Tektonische Ursachen
- Subrosions- und halokinetisch bedingte Entstehung
- Entstehung durch Gletscherschurf (Exaration)
- Entstehung durch Sedimentverflüssigung („Liquefaction“, „Piping“)
- Entstehung durch Unterkühlung („Supercooling“)
- Entstehung durch subglaziale Schmelzwässer (Sporadische, plötzliche subglaziale Flutereignisse von im Eis aufgestauten Schmelzwässern).

Die letztgenannte Erklärungsmöglichkeit wird von den meisten Quartärgeologen bevorzugt, da dadurch die Gesamtheit der Geländebefunde am ehesten erklärt werden kann (Smed 1998, Piotrowski 1994). Danach ist die Entstehung der Rinnen an die Rückzugsphasen des Eises und an die Verhältnisse im Bereich der Gletscherbasis gebunden, wo unter Druck stehende große Schmelzwassermengen sowie unkonsolidierte und ungefrorene Sedimente vorhanden sein sollten. Außerdem ist zunächst im Bereich der Gletscherstirn eine Blockade (z. B. durch Eis, Permafrost) des zum Gletscherrand gerichteten Abstroms der Wässer notwendig, die nach ihrem Bruch ein katastrophales Entleeren des gespeicherten Wasserreservoirs mit entsprechenden Erosionsleistungen ermöglicht (Kehew 2007). Für den katastrophalen Abfluss wird als Begründung auch angeführt, dass ein nur konstanter aus Grundwasser und Schmelzwässern gespeister Abstrom innerhalb des umfangreichen Gesamtrinnensystems wegen der dafür notwendigen großen Wassermengen nicht plausibel erscheint. Die Breite der Rinnen ergibt sich aus der Summe von nacheinander folgenden Einzelereignissen im Wechsel aus hohen Schmelzwasseraufkommen im Frühjahr und geringen im Winter, die jeweils in vertikaler und/oder horizontaler Richtung durch das Erosionsergebnis für die beobachteten Rinnendimensionen verantwortlich waren (Smed 1998). Die Füllung der Rinnen resultiert aus der Sedimentfracht des strömenden Wassers, der aus dem basalen Tauen anfallenden Gletscherfracht und aus möglichen Rutschungen an den Rinnenflanken.

24.3 Sachlage am Standort

Während der Elster-Kaltzeit drangen die skandinavischen Gletscher zum ersten Mal weit nach Mitteleuropa vor und überdeckten den Standort mit einer mehrere hundert Meter mächtigen Eisschicht. Analog zu den Verhältnissen der Saale-Kaltzeit (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung) kann von etwa 700 bis 1.500 m Eismächtigkeit ausgegangen werden. Während der Rückzugphase des elsterzeitlichen Inlandeises entstanden im gesamten norddeutschen Raum glaziale Rinnen mit unterschiedlichen Dimensionen und Tiefenerstreckungen, von denen eine den Salzstock Gorleben in nordost-südwestlicher Richtung quert (vgl. Köthe et al. 2007: Abb. 14). Mit der Entstehung der Gorlebener Rinne wurden die vorhandenen Deckgebirgsschichten lokal bis auf das Hutgestein und stellenweise bis zum Salzspiegel auf einer Fläche von ca. 7,5 km² erodiert. Die Rinne hat im Bereich des Salzstocks eine Breite von ca. 2 bis 4 km (bezogen auf Höhe der -100 m NN Tiefenlinie; Köthe et al. 2007: Abb. 14) und Tiefen größer als 200 m unter NN. Die tiefsten Bereiche der Gorlebener Rinne liegen über dem Salzstock in nordöstlicher Richtung etwa 5 km vom Erkundungsbereich 1 in ca. 340 bis 360 m unter NN (Bornemann et al. 2008: Abb. 11). Ihre Füllung besteht im Wesentlichen aus Schmelzwassersanden, vereinzelt Geschiebemergelvorkommen und dem nach oben abschließenden Lauenburger Ton-Komplex. Darüber kamen in einem unruhigen Relief die überwiegend tonigen Sedimente der Holstein-Warmzeit mit unterschiedlichen Mächtigkeiten zur Ablagerung. Während der Rinnenbildung gelangte Süßwasser in den Bereich des Salzspiegels, was eine verstärkte Subrosion zur Folge hatte. Köthe et al. (2007) berechnen durchschnittliche Ablagerungsraten von 0,22 mm/Jahr für den Zeitraum der Saale-Kaltzeit (110.000 Jahre), die die Ablagerungsverhältnisse unmittelbar nach der Entstehung der Rinne verdeutlichen. Für den gesamten Zeitraum Elster-Kaltzeit bis rezent (ca. 480.000 Jahre) geben Bornemann et al. (2008: 71; Tab. 3) etwas geringere Werte von 0,1 bis 0,2 mm/Jahr an, was auf eine zunehmende Versalzung des tiefen Grundwassers und abnehmende Grundwasserbewegungen seit der Saale-Kaltzeit schließen lässt. Auffällig ist, dass unterhalb der quartären Rinne nur äußerst geringe Subrosionsraten festgestellt werden (Bornemann et al. 2008: 73).

24.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Für die prognostizierte nächste Kaltzeit (Typ Weichsel) ist mit keiner Rinnenbildung zu rechnen, da die hierfür notwendige Überdeckung des Standortes mit Inlandeis nicht

erwartet wird (vgl. Forsström 1999). In dem Nachweiszeitraum von einer Million Jahre müssen aber auch Kaltzeiten vom Typ Elster unterstellt werden, so dass mindestens eine weitere Rinnenbildung im Bereich des Standortes möglich wäre. Aus den Prozessen der Vergangenheit ist abzuleiten, dass bei einer extremen Rinnenbildung das bestehende Deckgebirge stellenweise vollständig und, analog zu den Rinnen in Festgesteinen (vgl. Kap. Allg. Informationen und Beispiele), das an solchen Stellen darunter liegende Salzgestein in der Größenordnung von ca. 50 m Mächtigkeit erodiert werden kann. Da am Standort der Salzspiegel durchschnittlich um die 250 m (westliche und mittlere Salzstockbereiche) und maximal bei ca. 340 m unter NN (Nordosten des Salzstocks) liegt (Bornemann et al. 2008: Abb. 11), würde eine zukünftige Rinnenbildung unter Berücksichtigung ihrer Erosionsleistung in Festgesteinen diesen Wert bis auf ca. 300 bis 390 m vergrößern.

Nach der Quartärbasiskarte von Stackebrandt et al. (2001) erreichen die Rinnentiefen im Lockergestein durchschnittliche Werte von etwa 200 bis 300 m. Die daraus abzuleitende hydrodynamische Erosionsleistung ist damit als wahrscheinlich bei der Bildung zukünftiger Rinnen in Lockergesteinen zu unterstellen. Die bekannten tieferen Rinnen mit Erosionsteufen bis über 500 m sind sehr viel seltener. Ihre Entstehung gilt während der zukünftigen Entwicklung damit als weniger wahrscheinlich. Im Zuge der wahrscheinlichen Entwicklung mit einer weiteren zu unterstellenden zukünftigen Elsterkaltzeitlichen Rinnenbildung wird das aus Lockergesteinen bestehende Deckgebirge vollständig bis in Tiefen von 200 bis 300 m ausgeräumt. Da außerdem im südwestlichen und mittleren Teil des Salzstocks der Salzspiegel heute relativ hoch liegt, könnte er um ca. 50 m bis in eine Tiefe von ca. 300 m erodiert werden. Eine Tieferlegung des Salzspiegels im nordöstlichen Teil des Salzstocks würde wegen seiner heutigen Tiefenlage von > -300 m dagegen nicht erfolgen.

Wenn für die weniger wahrscheinliche Ausprägung Erosionsleistungen von über 500 m im Lockergestein unterstellt werden, so besteht die Möglichkeit, dass an jeder Stelle das über dem Salzstock liegende Deckgebirge vollständig durch eine Rinnenbildung abgetragen wird. Die dabei zugrunde liegende Hydrodynamik hätte analog zur wahrscheinlichen Entwicklung das Potential, das Salzgestein um ca. 50 m zu erodieren. Im südwestlichen und mittleren Teil des Salzstocks fände ausgehend von der heutigen Situation eine Erosion des Salzspiegels bis in eine Tiefe von ca. 300 m und im nordöstlichen Teil bis in eine Tiefe von ca. 390 m statt.

Während der Bildung einer Rinne, die tief bis zum Hutgestein reicht, kommt es zu einem Austausch von Ablaugungswässern mit Süßwasser über dem Salzstock (vgl. FEP Subrosion). Dies ermöglicht eine verstärkte Subrosion des Salzgesteins. Mit der Rinnenbildung ist lokal eine Umgestaltung der Sedimente des Deckgebirges verbunden, wobei heute existierende tonige, gering Wasser leitende Schichten (z. B. Lauenburger Ton, Holstein-Ton) durch sandige Sedimente ersetzt werden könnten. Andererseits ist aber auch die erneute Ablagerung von tonigen Schichten in größerem Umfang und in größerer Mächtigkeit möglich.

Der im Verschlusskonzept für das Endlager vorgesehene Schachtverschluss verfügt über mehrere Dichtelemente und reicht von einigen Zehnermetern unterhalb des Salzspiegels bis tief in das Salzgestein. Es ist davon auszugehen, dass nur der obere Teil des Schachtverschlusses durch eiszeitliche Einwirkungen in seiner Funktion beeinträchtigt wird.

24.5 Zeitliche Beschränkung

Zukünftige Rinnenbildungen sind erst im Zuge von Kaltzeiten (bevorzugt Typ Elster) mit einer vollständigen Inlandvereisung zu erwarten

24.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

24.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

24.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein, Schachtverschluss

24.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Der Prozess der Rinnenbildung ist bei zukünftigen Kaltzeiten wahrscheinlich, da sich bei vergleichbarer Eisüberdeckung des Standortes entsprechende hydrodynamische Verhältnisse wie in der Vergangenheit einstellen können.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP Glaziale Rinnenbildung ist für alle Teilsysteme (Deck- u. Nebengebirge, etc.) zu berücksichtigen. Eine Ausnahme bildet das Nahfeld, das wegen der Tiefenlage des Endlagers nicht betroffen ist.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Durch die hydromechanische Erosion der Gesteine erfolgen die Bildung einer Rinne und eine Beeinträchtigung der genannten Initial-Barrieren.

24.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erosion

Vollständige Inlandvereisung

Wirtsgestein

Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Erosion: In Folge einer Erosion des Untergrundes entstehen glaziale Rinnen. Das Ausmaß der Rinnenbildungen ist von der Festigkeit des Gesteins abhängig.

Vollständige Inlandvereisung: Glaziale Rinnenbildungen i. S. der favorisierten Genese sind nur bei einer Überdeckung des Standortes mit Inlandeis möglich.

Deck- und Nebengebirge, Wirtsgestein: Die Härte und Zusammensetzung der Gesteinsschichten beeinflussen die Eintiefung der Rinnen.

Resultierende FEP:

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: In Folge einer Rinnenbildung kommt es mit der Beseitigung der Deckgebirgsschichten und bis zu der sich anschließenden Wiederauffüllung der Rinnen mit jüngeren Sedimenten zu einer Druckentlastung im Wirtsgestein.

Beeinflusste FEP:

Sedimentation

Verschlußmaterial

Schachtverschlüsse

Wirtsgestein

Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Begründungen:

Sedimentation: Rinnen sind Hohlformen in der Landschaft und wirken als Auffangbecken für transportiertes Material ("Sedimentfallen").

Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse: Mit den Deckgebirgsschichten können auch die Verschlussmaterialien und Schachtverschlüsse der oberen Schachtabschnitte abtransportiert oder beeinträchtigt werden.

Wirtsgestein, Deck- und Nebengebirge: Durch die Rinnenbildungen werden die Gesteinsschichten verändert.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Mit der Bildung der Rinnen kommt es zum Ersatz von Salzwässern durch Süßwasserzufuhr und zu einer Umgestaltung der Deck- und Nebengebirgsschichten, was zur Änderung der hydrogeologischen Verhältnisse führt.

Topografie: Mit der Bildung von Rinnen werden Hohlformen geschaffen, wodurch die Topografie umgestaltet wird.

Bemerkungen:

FEP Diagenese, Subrosion als Abhängigkeiten gestrichen: Die Subrosion wird nur indirekt über die Änderung der hydrogeologischen Verhältnisse beeinflusst.

24.11 Offene Fragen

Verbesserung des Verständnisses zur Rinnengenese, Abschätzung möglicher Erosionstiefen und Tiefenwirkung der Eisauflast, bzw. Mächtigkeitsminderung des Deckgebirges.

24.12 Literaturquellen

Beaney, C. L. (2002): Tunnel channels in southeast Alberta, Canada: evidence for catastrophic channelized drainage. - Quaternary International, 90: 67-74; Amsterdam.

Ehlers, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. - Ferdinand Enke Verlag, 1. Aufl.: 358 S.; Stuttgart.

Ehlers, J. (2011): Das Eiszeitalter. - Spektrum Akademischer Verlag: 363 S.; Heidelberg.

Forsström, L. (1999): Future glaciation in Fennoscandia. - Posiva OY, POSIVA, 99-30: 31 S.; Helsinki.

Glasser, N. F., Etienne, J. L., Hambrey, M. J., Davies, J. R., Waters, R. A., Wilby, P. R. (2004): Glacial meltwater erosion and sedimentation as evidence for multiple glaciations in west Wales. - *Boreas*, 33: 224-237; Oslo.

Hinsch, W. (1979): Rinnen an der Basis des glaziären Pleistozäns in Schleswig-Holstein. - *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 29: 173-178; Hannover.

Huuse, M., Lykke-Anderson, H. (2000): Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin. - *Quaternary Science Reviews*, 19 (12): 1233-1253; Amsterdam.

Kehew, A. E., Lord, M. L., Koslowski, A. L. (2007): Glacifluvial Landforms of Erosion. (In: Elias, S. A. (ed.): *Encyclopedia of Quaternary Science*). - Elsevier, 1. Aufl., Vol. 1: 818-831; Amsterdam.

Keller, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 24 S.; Hannover.

Keller, S. (2010): Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland. (In: Flügge, J. & Rübel, A.: *Grundsatzfragen Hydrogeologie. Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE. Braunschweig, 5.-6. November 2009*). - Ges. f. Anl.- u. Reaktorsicherheit mbH, GRS-264: 145-173; Braunschweig.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - *Geol. Jb.*, C 72: 201 S.; Hannover.

Kuster, H., Meyer, K.-D. (1979): Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen. - *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 29: 135-156; Hannover.

Piotrowski, J. A. (1994): Tunnel valley formation in northwestern Germany - Geology, mechanisms of formation, and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley. - *Sediment. Geol.*, 89: 107-141; Amsterdam.

Schroeder, J. H. (1995): Die Kreuzbrückenspalte von Rüdersdorf - subglaziale Erosion im Wellenkalk. - *Berliner geowiss. Abh., Reihe A*, Bd. 168: 177-189; Berlin.

Smed, P. (1998): Die Entstehung der dänischen und norddeutschen Rinnentäler (Tunneltäler) - Glaziologische Gesichtspunkte. - *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 48: 1-18; Hannover.

Stackebrandt, W., Ludwig, A. O., Ostaficzuk, S. (2001): Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas (map 2). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (eds.): *Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346*). - *Brandenburgische Geowiss. Beitr.*, 8, 1: 13-19; Kleinmachnow.

Stackebrandt, W. (2009): Subglacial channels of Northern Germany - a brief review. - *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 160/3: 203-210; Stuttgart.

Thiermann, A., Koch, M., Will, K.-H. (1970): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25000. Erläuterungen zu Blatt 3711 Bevergern. - *Geol. Landesamt Nordrhein-Westfalen*: 120 S.; Krefeld.

Weiterführende Literatur:

Elias, S. A. (ed.) (2007): *Encyclopedia of Quaternary Science*. - Elsevier, Vol. 1-4: 3365 S.; Amsterdam.

Jorgensen, F., Sandersen, P. B. E., Bakker, M. (2006): Buried valleys - nature and groundwater interests. (In: Kirsch, R., Rumpel, H.-M., Scheer, W., Wiederhold, H. (Hrsg.): *Groundwater Resources in Buried Valleys. A Challenge for Geosciences*). - GGA (Leibniz Institute for Applied Geosciences): 11-18; Hannover.

25 Meteoriteneinschlag (1.5.01.01)

25.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Meteoriteneinschlag wird das Auftreffen von Festkörpern außerirdischen Ursprungs bezeichnet, die die Erdatmosphäre durchqueren und die Erdoberfläche erreichen. Dort können sie Schäden verursachen, deren Ausmaß u. a. vom Impuls des Meteoriten abhängig ist.

25.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Unter dem Begriff „Meteorit“ werden vereinfachend im Folgenden auch Asteroide und Kometen zusammengefasst.

Etwa einmal in 1.000 Jahre können Meteorite mit ca. 102 Megatonnen TNT-Äquivalent auf der Erde einschlagen. Größere Meteorite mit einer in den Untergrund reichenden Zerstörungskraft treten selten auf. Prinzipiell nimmt die Einschlagwahrscheinlichkeit mit Zunahme der Größe von Himmelskörpern ab. Nach Frater (2005) ist im Durchschnitt alle 100 Millionen Jahre mit dem Einschlag eines mehrere Kilometer großen Meteoriten von der Größe des K/T (Kreide/Tertiär)-Meteoriten zu rechnen, dessen Einschlag am Übergang von der Kreidezeit zum Tertiär vor 65 Mio. Jahren einen Krater mit 180 km Durchmesser ausgebildet hat, eine Zerstörungskraft von ca. $1E+8$ Megatonnen TNT-Äquivalent entwickelte und als Ursache für das Aussterben vieler Spezies, z. B. der Dinosaurier, angesehen wird. Zum Vergleich: das weltweite Atomwaffenarsenal beträgt etwas mehr als $1E+4$ Megatonnen TNT-Äquivalent (aus Frater 2005).

Sehr kleine Meteoriten (< kg) treffen täglich auf die Erdoberfläche.

25.3 Sachlage am Standort

Aus dem näheren Umkreis des Standortes im Raum Braunschweig, Uelzen und Lüchow wurde zuletzt der Einschlag eines Meteoriten im Jahre 1985 registriert (Meyer et al. 1986) und ein Fragment von 43 Gramm aufgefunden. Der Einschlag eines sehr großen Himmelskörpers fand im Standortbereich nicht statt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein großer Meteorit einschlagen kann, ist überall auf der Welt gleich groß.

25.4 Standortspezifische Auswirkungen

Meteorite mit einem Durchmesser von > 1 km verursachen Krater mit Durchmessern von >10 km und einigen hundert Metern Tiefe. Die Zerrüttung der Erdkruste geht dabei noch wesentlich tiefer (z. B. Koeberl & Anderson 1996; Koeberl & Henkel 2005). Der direkte Einschlag eines großen Himmelskörpers am Endlagerstandort kann die Integrität des Wirtsgesteins und alle Endlagerkomponenten vollständig zerstören. Ein Einschlag in weiterer Entfernung z. B. im Ozean würde nur indirekte Folgen haben, indem Flutwellen entstehen, die alle niedrig gelegenen Landbereiche Nordeuropas (z. B. Holland, Dänemark; Peiser et al. 1998: 25) und damit auch ein Endlager im Bereich Gorleben überfluten. Auswirkungen auf ein geschlossenes Endlager bestünden dabei nicht.

Die etwas häufigeren Meteorite mit einer Größe von einigen hundert Metern Durchmesser sind in der Lage, bei einem direkten Treffer des Standortes das Deckgebirge und die oberen Teile des Salzstocks zu schädigen. Das in mehr als 800 m Tiefe gelegene Endlager würde hiervon nicht direkt betroffen sein.

Die drastischen Auswirkungen eines die Endlagerbarrieren und den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zerstörenden großen Meteoriteneinschlags sind für den Menschen und die Umwelt wesentlich bedeutsamer als eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager. Im Zusammenhang mit der Sicherheit des Endlagers wird das FEP Meteoriteneinschlag daher nicht betrachtet.

Sicher wirkende Maßnahmen zur Verhinderung von Meteoriteneinschlägen existieren derzeit nicht.

25.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

25.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [X] nicht zu betrachten

25.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

25.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

25.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Der direkte Einschlag eines km-großen Meteorits am Endlagerstandort wird wegen den im Vergleich zu radiologischen Freisetzungen aus dem Endlager deutlich größeren Auswirkungen als nicht zu betrachten eingestuft.

Wirkung den Teilsystemen: Entfällt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Entfällt

25.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

25.11 Offene Fragen

Keine.

25.12 Literaturquellen

Frater, H. (2005): Phänomene der Erde. Landschaftsformen. - Springer, 1. Aufl.: 247 S.; Berlin.

Koeberl, C., Anderson, R.R. (eds.) (1996): The Manson Impact Structure, Iowa. Anatomy of an Impact Crater. - Geol. Soc. Amer., Spec. Pap. 302: 468 S.; Boulder, USA.

Koeberl, C., Henkel, H. (eds.) (2005): Impact Tectonics. - Springer, 1. Aufl.: 552 S.; Berlin.

Meyer, K.-D., Steinwachs, M. (1986): Die Feuerkugel vom 14. November 1985 über Niedersachsen und der DDR; Beobachtung, seismologische Registrierung und Auffindung eines Teiles des Meteoriten. - Braunsch. Naturk. Schr., 2, 3: 585 -594; Braunschweig.

Peiser, B.J., Palmer, T., Bailey, M.E. (eds.) (1998): Natural catastrophes during Bronze Age civilisations, archaeological, geological, astronomical and cultural perspectives. - BAR (British Arch. Rep.) Int. Ser., 728: 252 S.; Oxford.

Weiterführende Literatur:

Huggett, R.J. (2006): The Natural History of the Earth. Debating long-term change in the geosphere and biosphere . - Routledge Studies in Physical Geography and Environment: 203 S.; London.

26 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

26.1 Definition/Kurzbeschreibung

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen sind potentielle Transportwege für Fluide.

26.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Für die Erkundung des internen Aufbaus von Salzstrukturen und der räumlichen Verteilung unterschiedlicher Salzsichten (z. B. erforderlich für die Einhaltung von Sicherheitsabständen der bergmännischen Auffahrungen bzw. Hohlräume zu bestimmten Salzgesteinen) sowie für die Gewinnung von Probenmaterial für mineralogisch-geochemische und gesteinsphysikalische Untersuchungen werden im Verlaufe der Standorterkundung über- und untertägige geologische Erkundungsbohrungen gestoßen. Die räumliche Orientierung, Länge sowie Durchmesser und Anzahl der Erkundungsbohrungen ergeben sich aus ihren geologischen Zielstellungen bzw. aus dem Erkundungskonzept. Um das Wirtsgestein durch Erkundungsbohrungen möglichst wenig zu beeinträchtigen, werden die Bohrungen mit einem möglichst geringen Durchmesser (ca. 40 mm bis maximal ca. 130 mm) gestoßen, ihre Anzahl möglichst minimal gehalten und die Bohrungen selbst nach ihrer Nutzung (z. B. für Permeabilitätsmessungen oder geophysikalische Untersuchungen) qualitätsgesichert verschlossen, d. h. zementiert.

26.3 Sachlage am Standort

Zur Erkundung der Wirtsgesteinszusammensetzung und -eigenschaften sowie seiner Internstrukturen sind trotz Einsatz von geophysikalischen Untersuchungsverfahren (EMR-Messungen) Erkundungsbohrungen erforderlich. Eine Zusammenstellung der vorhandenen übertägigen und untertägigen Erkundungsbohrungen erfolgt in Beuth et al. (2012). Bei ordnungsgemäßer Verfüllung stellen die Bohrungen kein sicherheitstechnisches Problem dar. Im Erkundungsbergwerk Gorleben werden die untertägigen Bohrungen mit hygroskopischem Magnesia-Binder, entweder in Form von kaustischem Magnesit oder als Magnesiumoxid zementiert. Die in den Bohrungen genutzten Ausbaumaterialien, wie z. B. Standrohre, werden vor dem Verschluss der Bohrungen soweit wie möglich entfernt, um Korrosionsprozesse zu vermeiden.

Bei nicht anforderungsgemäßigem Verschluss können die übertägigen Grundwassererkundungsbohrungen auf die Grundwasserverhältnisse im Deck- und Nebengebirge geohydraulische Auswirkungen haben, indem sie Grundwasserstockwerke verbinden, die unter natürlichen Bedingungen voneinander isoliert, d. h. durch geringdurchlässige Schichten getrennt gewesen wären. Der Beitrag zu einem möglichen Radionuklidtransport durch solche Bohrungen ist gegenüber einem Transport durch hochdurchlässige Grundwasserleiter allerdings zu vernachlässigen.

26.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Erkundungsbohrungen untersuchen den geologischen Aufbau des Deck- und Nebengebirges sowie das Wirtsgestein und schaffen damit mögliche Wegsamkeiten für Fluide in das Wirtsgestein hinein und aus dem Wirtsgestein in das Nebengestein. Unverfüllt beeinträchtigen sie die Integrität des Wirtsgesteins im jeweils durchbohrten Bereich. Ordnungsgemäß verfüllte bzw. zementierte Bohrungen stellen keine Wegsamkeiten für Lösungen oder Gase dar. Nicht anforderungsgemäß verschlossene Bohrungen können Migrationsbahnen für Fluide in das Endlager oder aus dem Endlager heraus darstellen. Eine Bewertung der langzeitsicherheitsliche Relevanz von Erkundungsbohrungen im Salzstock Gorleben erfolgt in Beuth et al. (2012).

26.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

26.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[] wahrscheinlich, [X] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

26.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

26.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein

26.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das FEP wird als weniger wahrscheinlich eingestuft, da alle Bohrungen qualitätsgesichert verfüllt werden.

Wirkung in den Teilsystemen: Für alle Teilsysteme mit Ausnahme des Nahfeldes zu berücksichtigen, da sich Bohrungen im Deck- und Nebengebirge, Wirtsgestein und den Strecken und Schächten befinden bzw. von ihnen ausgehen.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen können die Gesamtpermeabilität des Wirtsgesteins erhöhen.

26.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Diapirismus

Konvergenz

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Zersetzung von Organika

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Konvergenz: Durch die Konvergenz werden Resthohlräume verschlossen und das Verfüllmaterial fest mit dem Salzgestein umschlossen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Starke Spannungsänderungen oder Spannungsumlagerungen können zum Aufreißen verfüllter Bohrungen führen.

Diapirismus: Salzbewegungen im Zuge des Diapirismus können Bohrungsabschnitte gegeneinander versetzen.

Metallkorrosion: Evtl. noch im Bohrloch vorhandene Metallteile können bei Korrosion zu Wegsamkeiten beitragen.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Der beim Verfüllen der Bohrungen genutzte Zement kann beim Vorliegen entsprechender Randbedingungen (Wasser, Sauerstoff) einer Korrosion unterliegen.

Auflockerungszone: Die Auflockerungszone zeigt bis zum Abschluss der Konvergenz erhöhte Durchlässigkeiten im Bereich des Bohransatzes.

Zersetzung von Organika: Evtl. noch im Bohrloch vorhandene Kunststoffstandrohre können bei Korrosion zu Wegsamkeiten beitragen.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude, Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Nicht ordnungsgemäß verschlossene oder teilverschlossene Bohrungen ermöglichen ggf. einen Zutritt von Lösungen in das Grubengebäude außerhalb des Nahfeldes.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Grundwasserströmung und Gasströmung im Deck- und Nebengebirge können durch unvollkommen verschlossene Bohrungen beeinflusst werden.

26.11 Offene Fragen

Keine.

26.12 Literaturquellen

Bornemann, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen. - BfS-Schriften, 4/91: 67 S.; Salzgitter.

Wakeley, L.D., Poole, T. S.,Burkes, P.J. (1994): Durability of Concrete Materials in High-Magnesium Brine. Contract Report. - Sandia National Laboratories, SAND 93-7073; Albuquerque, USA.

Zirngast, M., Zirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht. - BGR, Ber.: 570 S.; Hannover.

Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J. (2012): Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Anhang D: Erkundungsbohrungen im Salzstock Gorleben. - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

27 Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)

27.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Radionuklidinventar umfasst die Aktivitäten aller Radionuklide, die mit den Abfällen in das Endlager eingebracht werden.

27.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das Radionuklidinventar verbleibt am Einlagerungsort und verringert sich auf Grund des radioaktiven Zerfalls. Kommt es zu einem Ausfall eines Endlagerbehälters, können bereits im Endlagerbehälter mobilisierte Radionuklide freigesetzt und gegebenenfalls weitere Radionuklide mobilisiert werden. Das Verhalten der gelösten und gasförmigen mobilisierten Radionuklide wird mit den FEP Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und Radionuklidtransport in der Gasphase beschrieben.

Gemäß BMU (2010) sind Freisetzungen von Radionukliden aus natürlich vorkommenden Materialien (Versatz, Gebirge) gesondert von Freisetzungen von Radionukliden aus den endgelagerten Abfällen zu bewerten. Sie werden im FEP-Katalog nicht unter dem Radionuklidinventar subsumiert. Die Aktivitätsanteile der natürlichen Radionuklide in Behältermaterialien der Endlagergebäude sind zu bilanzieren. Sie werden gegenüber dem Inventar künstlicher Radionuklide in den Abfällen der Endlagergebäude zu vernachlässigen sein.

27.3 Sachlage am Standort

Zu den radioaktiven Abfällen, die in einem Endlager am Standort zu berücksichtigen sind, gehören:

- bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren (direkte Endlagerung),
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe und
- bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren.
- graphithaltige Abfälle,

- verpresste Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung,
- Urantails aus der Urananreicherung sowie
- sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die z. B. aufgrund ihrer radiologischen Eigenschaften nicht in einem anderen Endlager endgelagert werden können.

Detaillierte Angaben zu den jeweiligen Abfallströmen werden in Peiffer et al. (2011) dargestellt. Für die Ableitung der Menge und Qualität der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung konnten dabei nur Annahmen getroffen werden.

Die in Peiffer et al. (2011) zusammengestellten Daten zum Radionuklidinventar zeigen, dass die Aktivität des Inventars nachhaltig durch die endgelagerten bestrahlten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren sowie die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestimmt wird. Unter Berücksichtigung der Altersstruktur der Brennelemente sowie der Wiederaufarbeitungsabfälle ergibt sich für das Jahr 2075 eine Gesamtaktivität im Endlager von ca. $6,2 \text{ E}+19 \text{ Bq}$ (Brennelemente: ca. $5,3 \text{ E}+19 \text{ Bq}$, Wiederaufarbeitungsabfälle: ca. $9,0 \text{ E}+18 \text{ Bq}$) ergeben.

Zur Gesamtaktivität liefern die endzulagernden bestrahlten Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren einen Beitrag in der Größenordnung von $1 \text{ E}+16 \text{ Bq}$. Gegenüber der Gesamtaktivität der bestrahlten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und den verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ist der Beitrag der bestrahlten Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren nachrangig.

Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle wurde in Peiffer et al. (2011) ein Modellinventar abgeleitet.

Unter Endlagerbedingungen sind bei den gasförmigen Radionukliden unter Berücksichtigung der Halbwertszeiten vor allem C-14 und I-129 zu betrachten. Tritium kann durch Korrosionsprozesse neu gebildet werden, ist aber auf Grund der sehr kurzen Halbwertszeit für Langzeitbetrachtungen nicht relevant. Bei I-129 ist bei den Bedingungen in einem Endlager in Salzgestein hauptsächlich von dissoziiertem Iodwasserstoff auszugehen, so dass I-129 hauptsächlich in der wässrigen Phase transportiert wird und nur in äußerst geringem Maße in die Gasphase übergehen kann.

27.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das Radionuklidinventar und die resultierenden thermischen Einwirkungen auf das Salzgebirge, das Grubengebäude und die geotechnischen Barrieren bilden eine wesentliche Auslegungsanforderung für die Endlagerplanungen. Gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept (Mönig et al. 2012) darf ein Temperaturgrenzwert von 200 °C an der Behälteroberfläche nicht überschritten werden, wobei auch mögliche Überlagerungen der Temperatureinwirkungen benachbarter Einlagerungsbereiche zu berücksichtigen sind. Somit bestimmt die Wärmeleistung der eingelagerten Abfälle die Anzahl der Abfallgebinde je Einlagerungsbohrloch bzw. -strecke sowie die Abstände zwischen den Einlagerungsbohrlöchern, -strecken und -bereiche und zu temperatursensiblen Carnallitvorkommen (Bollingerfehr et al. 2011).

Weiterhin bestimmt das Radionuklidinventar die Menge der mobilisierbaren und damit potentiell freisetzbaren Radionuklide (Quellterm). Aus der Stärke der gamma-Dosisleistung der Endlagergebinde ergibt sich die Intensität der Radiolyse.

Durch eine entsprechende Auslegung der Abfallgebinde und das Einlagerungskonzept wird eine Kritikalität des eingelagerten spaltbaren Materials in den Brennelementen ausgeschlossen (siehe FEP Kritikalität).

27.5 Zeitliche Beschränkung

Das radioaktive Inventar reduziert sich entsprechend den Halbwertszeiten der eingelagerten Radionuklide.

27.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

27.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

27.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

27.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Radionuklidinventar ist eine Randbedingung und damit wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Per Definition nur im Teilsystem "Nahfeld" (Abfallinventar) zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Radionuklide beeinträchtigen nicht direkt die Initial-Barrieren. Sie wirken indirekt über mehrere andere FEP.

27.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radioaktiver Zerfall

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Strahlungsinduzierte Aktivierung: Kann das Inventar an Radionukliden verändern.

Radioaktiver Zerfall: Verändert und reduziert das Radionuklidinventar.

Radionuklidmobilisierung: Übergang des Inventars in die flüssige Phase oder Gasphase, das Inventar wird reduziert.

Bemerkungen:

Hebung oder Absinken eines Behälters: Eine Verschiebung der Behälter verändert das Inventar am Einlagerungsort nicht.

Resultierende FEP:

Radioaktiver Zerfall

Begründungen:

Der radioaktive Zerfall ist eine immanente Eigenschaft radioaktiver Stoffe.

Beeinflusste FEP:

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Radionuklidmobilisierung: Das an einem Ort vorhandene Inventar ist eine wichtige Voraussetzung für eine Mobilisierung von Radionukliden.

Bemerkungen:

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase, Radionuklidtransport in der Gasphase: FEP werden indirekt über die Radionuklidmobilisierung beeinflusst.

Hebung oder Senkung von Endlagerbehältern: Das Inventar bestimmt die Menge, die transportiert werden kann, beeinflusst aber nicht den Prozess

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Der Einfluss des Radionuklidinventars auf das geochemische Milieu ist vernachlässigbar gering.

27.11 Offene Fragen

- Ermittlung des Radionuklidinventars für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung
- Ermittlung belastbarer Aktivitätsinventare für WA-Abfälle unterhalb der Garantiewerte.

27.12 Literaturquellen

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.(2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

28 Inventar: Metalle (2.1.01.02)

28.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die stoffliche Zusammensetzung und die Massen der in metallischer Form vorliegenden Elemente in den radioaktiven Abfällen, den Behältermaterialien der Endlagergebinde und den Einbauten in den Grubenbauen.

28.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Keine.

28.3 Sachlage am Standort

Der wesentliche Teil des Metall-Inventars im Endlager resultiert aus den Endlagerbehältern (Bollingerfehr et al. 2012, Dörr et al. 2012).

Für die Endlager-Variante B1 sind insgesamt 2.120 POLLUX-10-Behälter vorgesehen, von denen 1.398 mit DWR-Brennelemente, 520 mit SWR-Brennelemente und 202 mit WWER-DWR-Brennelemente beladen werden, 906 POLLUX-9-Behälter mit CSD-V, -B und -C sowie 511 CASTOR -Behälter mit Forschungs- und Prototypreaktor-Brennelementen (Bollingerfehr et al. 2012). Für die verschiedenen Behältertypen ergeben sich folgende Metallmassen (unbeladene Behälter):

POLLUX-10-Behälter für Leistungsreaktor-Brennelemente (max. 10 DWR-BE) und POLLUX-9-Behältern mit 9 CSD-Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen:

- Innenbehälter inkl. Primär- und Sekundärdeckel:
 - Stahl 15 MnNi6.3 (1.6210):20.620 kg
 - Büchse/Korb: Edelstahl (1.4541) mit Borblech beplankt (1 Ma.- % Bor), Oberflächen z. T. mit Kupfer beschichtet:: 2.100 kg
- Grundkörper Abschirmbehälter inkl. Deckel:
 - Gusseisen mit Kugelgraphit GGG40 (0.7040): 34.810 kg
 - Kühlrippen + Dämpfungselemente: Aluminium (keine Mengenangabe),

- Tragzapfen: Edelstahl (1.4313) X 5CrNi13.4) (keine Mengenangabe)

CASTOR AVR/THTR, CASTOR KNK und CASTOR MTR2 mit Forschungs- und Prototypreaktor-Brennelementen:

- CASTOR-THTR/AVR und KNK:
 - Grundkörper: Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040) 22.450 kg
 - Primär- und Sekundärdeckel: Schmiedestahl (TSE 355) bzw. unlegierter Stahl (Werkstoff St 52-3)
- CASTOR MTR 2:
 - Grundkörper: Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040) 15.170 kg
 - Primär- und Sekundärdeckel: Edelstahl (Werkstoff 1.0566 oder 1.4313), Tragkörbe: Aluminium).

Für die Endlager-Variante B2 werden die Leistungsreaktor- Brennelemente in 1.097 Transport- und Lagerbehältern (TLB) der Typen CASTOR V/19 (736 Behälter), CASTOR V/52 (300 Behälter) und CASTOR 440/84 (61 Behälter) eingelagert (Bollingerfehr et al. 2012). Für die Wiederaufarbeitungsabfälle sind 1.580 CSD-V in 79 CASTOR HAW 20/28 CG, 1.153 CSD-V bzw. 308 CSD-B in 42 bzw. 11 CASTOR HAW28M, 336 CSD-V in 12 TN85, 28 Kokillen in einem TS28V, 4.104 CSD-C Kokillen in 114 TGC36 sowie 511 CASTOR-Behälter mit Forschungs- und Prototypreaktor-Brennelementen vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2011a):

CASTOR V19, CASTOR V52 und CASTOR 440/84 (für Leistungsreaktor-Brennelemente). Die bei der Zwischenlagerung der Behälter verwendete Schutzplatte wird nicht mit endgelagert.

- CASTOR V/19 (für 19 DWR-Brennelemente):
 - Behälterkörper: Sphäroguss (EN-GJS-400-15U) 90.000 kg
 - Primär- und Sekundärdeckel: Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4) 6.800 kg
 - Tragkorb: boriertes Edelstahl/Aluminium 9.600 kg
- CASTOR V/52 (für 52 SWR-Brennelemente)
 - Behälterkörper: Sphäroguss (EN-GJS-400-15U) 87.000 kg

- Primär- und Sekundärdeckel: Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4) 6.800 kg
- Tragkorb: borierter Edelstahl/Aluminium 9.600 kg
- CASTOR 440/84 (84 DWR-Brennelemente des Typs WWER 70 oder WWER 440)
 - Behälterkörper: Sphäroguss (EN-GJS-400-15U) 80.000 kg
 - Primär- und Sekundärdeckel: Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4) 6.800 kg

CASTOR HAW 20/28 CG, CASTOR HAW 28M, TS28V, TN85 und TGC36 für Wiederaufarbeitungsabfälle in CSD-V/-B/-C.

- CASTOR HAW 20/28 CG: (20 oder 28 Kokillen), CASTOR HAW 28 M (28 Kokillen)
 - Behälterkörper: Sphäroguss (EN-GJS-400-15U) 99.600 kg
 - Behälterkörper + Deckel Schmiedestahl (keine Gewichtsangaben)
 - Abschirmung: Harz und Blei (keine Gewichtsangaben)
- TN28 (28 Kokillen)
 - Behälterkörper + Deckel: Schmiedestahl 94.700 kg
 - Abschirmung: Harz und Blei (keine Gewichtsangaben)
- TGC36 (keine Daten, in Entwicklung)

Für die Endlagerung von Leistungsreaktor-Brennelementen in CASTOR-Behältern ist zur Gewährleistung der Unterkritikalität ggf. eine Verfüllung des Behälterschachtes mit Magnetit oder abgereicherterem U_3O_8 vorgesehen (Chernykh et al. 2011).

Für die Endlagervariante C ist die Einlagerung der Brennelemente der Leistungsreaktoren in 7.068 BSK-Kokillen, der Forschungsreaktor-Brennelemente in 229 BSK AVR/THTR, 6 BSK KNK und 57 BSK MTR sowie der Wiederaufarbeitungsabfälle in 3.729 CSD-V-Kokillen in 1.308 Triplepacks, 308 CSD-B in 103 Triplepacks und 4.104 CSD-C in 1.368 Triplepacks vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2012):

- BSK (für Leistungsreaktor Brennelemente) (Leergewichte):
 - Behälterkörper mit Primär- und Sekundärdeckel: Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210) 3.126 kg

- 2 Innenbüchsen: Edelstahl (1.4541) 340 kg

Die BSK ist für die Aufnahme von AVR/THTR-Brennelement-Kugeln in Kannen zu modifizieren. In Analogie zu den Planungen (Bollingerfehr et al. 2011a, Bollingerfehr et al. 2012) wird dafür der Durchmesser der Kokille um 215 mm erweitert. Das Leergewicht wird ca. 4,1 Mg betragen. Insgesamt sind 229 modifizierte BSK erforderlich.

- CSD-V/-B/-C: Primärbehälter für Abfälle aus der Wiederaufarbeitung
 - Behälterkörper mit Deckel: Edelstahl Z15CN24.13 (Werkstoff 1.4833) 80 kg
- Wiederaufarbeitungsabfälle (CSD-V, CSD-C, CSD-B) in Triplepacks: Edelstahl (15MnNi6.3 (1.6210) ca. 500 kg

Gemäß dem Endlagerkonzept C werden die 300 m tiefen Einlagerungsbohrlöcher verrohrt (Bollingerfehr et al. 2012). Es handelt sich um 50 mm starke Sphäroguss-Liner (EN-GJS-400-15U) mit einem Innendurchmesser von 620 mm, die im Bohrloch tiefsten verschlossen sind und nach der Befüllung des Bohrlochs oben durch einen Deckel verschlossen werden. Durch diesen Ausbau werden ca. 225 Mg Stahl je Bohrloch in das Endlager eingebracht. Zur Einlagerung der modifizierten BSK für AVR/THTR-BE sind größere Bohrlöcher mit einem Innendurchmesser von 935 mm erforderlich. Material und Wandstärke entsprechen den anderen Verrohrungen, so dass sich aufgrund des größeren Durchmessers ein Gewicht von ca. 294 Mg Stahl je Bohrloch ergibt (insgesamt 5 Bohrlöcher).

Im Endlagerkonzept B2 werden in den horizontalen Bohrlochern Bronzeschienen mit Graphit eingebaut, um die Transport- und Lagerbehälter bis in die Einlagerungsposition zu schieben.

Zum Metallinventar gehören außerdem die Brennelemente (0,52 t Schwermetall (SM) je DWR-Brennelement, 0,20 t SM je SWR-Brennelement, 0,12 t SM je WWER-DWR-Brennelement, Summe 10.448 tSM) und metallische Abfälle (Brennelement-Hülsen und Strukturteile, Technologieabfälle aus der Wiederaufarbeitung, Konditionierung und dem Rückbau) (Bollingerfehr et al. 2011a, Bollingerfehr et al. 2011b).

Für die Endlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Variante A) sind 7.217 Konrad-Container Typ VI aus Stahlblech, 1.695 Konrad-Container Typ IV aus Stahlblech, 800 Betonbehälter Typ I, 2.620 MOSAIK-Behälter (= Konrad-Gussbehälter TYP II) mit 120 mm Pb-Abschirmung und je nachdem ob der Graphit und

die graphithaltigen Abfälle in Beton- oder Metallbehälter gepackt werden 3.450 MOSAIK-Behälter (= Konrad-Gussbehälter Typ II) oder 1.150 MOSAIK-Behälter ohne Pb-Abschirmung und 313 Konrad Container Typ IV aus Normalbeton vorgesehen. Bei den Betoncontainern/-behältern ist hier nur der Armierungsanteil zu betrachten (Bollingerfehr et al. 2011a, Dörr et al. 2011).

MOSAIK - Behälter für die Einlagerung von Brennelement-Strukturteilen (2.620 Behälter mit 120 mm Bleiabschirmung), sonstige radioaktive Mischabfälle (1.150 Behälter ohne Bleiabschirmung) und (optional) graphithaltige Abfälle (3.450 Behälter ohne Bleiabschirmung) (Bollingerfehr et al. 2011b, Bollingerfehr et al. 2012, Dörr et al. 2011; im folgenden Gewichtsangaben je Gebinde):

- Behälterkörper inkl. Deckel: Gusseisen mit Kugelgraphit GGG40 (0.7040) 5.600 kg
Bleiauskleidung (120 mm) 3.600 kg
- Konrad-Container Typ VI für Urantails (7.217 Behälter) Stahlblech (St 37.2) 1.350 kg
- Konrad-Container Typ IV für Mischabfälle (1.695 Behälter), Stahlblech (St. 37.2) 2.200 kg
- Betonbehälter Typ I für Mischabfälle (800 Behälter), Armierung im Beton 100 kg
- Konrad-Container Typ IV für Graphit und graphithaltige Abfälle (313 Behälter), Armierung im Beton 700 kg

Metallanteil in den Abfällen (Peiffer et al. 2011):

- Brennelement-Strukturteile: Chrom 236,70 Mg
 - Molybdän 1,30 Mg
 - Nickel 213,88 Mg
 - Aluminium 3,20 Mg
 - Niob 3,39 Mg
 - Titan 8,17 Mg
 - Eisen 830,00 Mg
 - Mangan 22,3 9 Mg

- Mischabfälle:
 - Aluminium 458,00 Mg
 - Stahl 1.256,00 Mg
 - Zink 0,20 Mg

Obwohl nicht in metallischer Form vorliegend, werden die Urantails in das Inventar: Metalle eingeschlossen:

- Urantails:
 - Uranoxid 109.760,00 Mg
 - Uranylfluorid 2.240,00 Mg

Weiterhin enthalten die kompaktierten, metallischen Wiederaufarbeitungsabfälle (in CSD-C) ca. 4.300 Mg Metall.

Das Metallinventar umfasst darüber hinaus auch die metallischen Einbauten in den Grubenbauen (z. B. Schienen, Anker, Netze, Kabel, Messinstrumentierung) (vgl. FEP Technische Einrichtungen). Dieser Anteil ist zurzeit nicht quantifizierbar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass prinzipiell die Möglichkeit besteht, einen Teil der Einbauten rückzubauen und aus dem Grubengebäude zu entfernen.

Die Schachtausbauten befinden sich oberhalb der Dichtelemente der Schachtverschlüsse und wirken sich daher nicht unmittelbar auf den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle aus. Die hier verbauten Stahl- und Betonmassen beeinflussen aber den Chemismus der Deckgebirgschwässer, die oberhalb der Dichtelemente der Schachtverschlüsse anstehen, und wirken somit indirekt auf die Initial-Barriere „Schachtverschluss“ ein. Je Schacht sind etwa 3.466,8 Mg Stahl (St 52-3 und ESt E 690) verbaut (Linkamp & Müller-Hoeppe 2012).

28.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Die materialspezifischen Eigenschaften der bei der Herstellung verwendeten Metalle beeinflussen die Eigenschaften des Brennelement-Behälters. Außerdem beeinflussen Art und Menge der verwendeten Metalle das geochemische Milieu und die Gasmenge, die sich durch Korrosion bilden kann, sofern ausreichende Mengen an Lösung zur Ver-

fügung stehen. Metallische Korrosionsprodukte sind außerdem relevant für die Adsorption mobilisierter Radionuklide.

Mit den Urantails werden 2.240 t Uranylfluorid eingebracht, die das geochemische Milieu z. B. durch die Bildung von Flusssäure maßgeblich beeinflussen können.

28.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

28.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

28.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

28.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

28.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Metallinventar ergibt sich aus dem Endlagerkonzept und ist somit eine Randbedingung.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die materialspezifischen Eigenschaften der bei der Herstellung verwendeten Metalle beeinflussen die Eigenschaften der Initial-Barriere "Brennelement-Behälter".

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist den Teilsystemen "Nahfeld" (Endlagergebinde) sowie "Strecken und Schächte" (Anker, Schienen, Kabel und sonstiges techn. Equipment) zu berücksichtigen.

28.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Begründungen:

Abfallmatrix, Brennelement-Behälter, sonstige Endlagerbehälter, Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften: Das Metallinventar leitet sich aus der metallischen Abfallmatrix, den verschiedenen Behältern sowie den technischen Einrichtungen ab.

Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme, Strahlungsinduzierte Aktivierung: Durch diese Prozesse werden die Eigenschaften der Metalle verändert.

Hebung oder Senkung von Abfallbehältern: Diese Prozesse führen zu einer räumlichen Verschiebung der Metallinventare.

Bemerkungen:

Kokillensticking: Aufgrund des Einlagerungskonzeptes (verrohrte Bohrlöcher, Einbringen der Kokillen mit Distanzhaltern) ist ein Kokillensticking nicht zu betrachten.

Diapirismus: Dieser Prozess führt nur zu einer räumlichen Verschiebung der Metallinventare und wird daher nicht betrachtet.

Hebung oder Senkung von Abfallbehältern: Diese Prozesse führen nur zu einer räumlichen Verschiebung der Metallinventare und werden daher hier nicht betrachtet.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Sorption und Desorption

Begründungen: Abfallmatrix, Brennelement-Behälter, sonstige Endlagerbehälter, Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften: Durch die Art der Metalle werden die Eigenschaften der Endlagerbehälter und der technischen Einrichtungen beeinflusst.

Geochemisches Milieu: Durch das Metallinventar wird über das Redox-Potential das geochemische Milieu beeinflusst.

Metallkorrosion, Materialversprödung und der strahlungsinduzierten Aktivierung: Art und Umfang dieser Prozesse hängen vom Stoffbestand ab.

Sorption und Desorption: An Metalloberflächen kann Sorption oder Desorption stattfinden.

28.11 Offene Fragen

Erhebung der fehlenden Metallinventare der französischen Transport- und Lagerbehälter TS28V, TN28 und TGC36.

28.12 Literaturquellen

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011a): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011b): Umlagerung von 5.000 m³ verpresster Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung von West 2 nach Ost 17. - Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, AP 5, Memo vom 13.07.2011, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Chernykh, M., Graf., R., Filbert, W. (2011): Kritikalitätssicherheit von CASTOR® - Behältern während der Endlagerung. - Jahrestagung Kerntechnik, 17.-19. Mai 2011;; Berlin.

Dörr, S., Filbert, W., Tholen, M. (2011): Beantwortung der Fragen der GRS zu den Betonmengen, den Wasserinhalten und den ggf. vorhandenen Metallanteilen in den Behältern, in den Materialien bei der Konditionierung und in den Abfällen selbst. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben. DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Tholen, M. (2012): In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben. - DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Linkamp, M., Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J. (2012): Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer. Arbeitspaket AP 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Rev. 2, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.

29 Inventar: Organika (2.1.01.03)

29.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Inventar umfasst die stoffliche Zusammensetzung und die Massen der organischen Bestandteile in den radioaktiven Abfällen, der Abfallmatrix, Behältermaterialien (Neutronenmoderator, Farben und Lacke) der Endlagergebinde sowie in den Einbauten in den Grubenbauen.

29.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Organika sind vor allem aufgrund der Gasbildung durch bakterielle Degradation und durch entsprechende Radionuklide für den Langzeitsicherheitsnachweis relevant. Die wichtigste langzeitstabile organische Verbindung ist Methan mit den entsprechenden Radionukliden C-14 und Tritium (H-3 oder T). Iod ist in vielen organischen Verbindungen enthalten, so dass gegebenenfalls auch I-129 bei der Betrachtung radioaktiver organischer Spezies zu berücksichtigen ist.

29.3 Sachlage am Standort

Die derzeitigen Planungen sehen die Endlagerung von Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren in vollständig abgeschirmten POLLUX-10 oder CASTOR-Behältern bzw. in teilweise abgeschirmten Brennstabkokillen (BSK) vor (Bollingerfer et al. 2011). Ausgediente Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren werden in vollständig abgeschirmten CASTOR-Behältern oder in teilweise abgeschirmten modifizierten BSK-Kokillen endgelagert. Verglaste hochradioaktive und mittelradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden entweder in vollständig abgeschirmten POLLUX-9-Behältern oder in verschiedenen Transport- und Lagerbehältern bzw. in teilweise abgeschirmten Triple-Packs mit CSD-V, -B, -C eingelagert. Zur Abschirmung werden bei POLLUX- und CASTOR-Behältern im Behälterkörper eine Doppelreihe mit Polyethylenstäben (Lupolen und Gur) in Bohrungen sowie im Deckel- und Bodenbereich Polyethylenplatten angeordnet. Bei den französischen Behältern (TN 85 und TS28V) werden zur Abschirmung Harz und Blei verwendet (keine quantitativen Angaben verfügbar). Bei den Brennstabkokillen und Triple-Packs ist noch

keine Festlegung erfolgt, ob Polyethylen oder Graphit im Kopfbereich zur Abschirmung eingesetzt werden soll.

Im Einzelnen ergeben sich folgende Mengen an Abschirmmaterialien je Behälter und Endlagervariante (Bollingerfehr et al. 2011, Bollingerfehr et al. 2012, Dörr et al. 2012):

- BSK: 7 kg je Behälter, Summe Variante C: 51,52 Mg (7.360 BSK)
- Triple-Packs: 7 kg je Behälter, Summe Variante C: 19,45 Mg (2.779 Triple-Packs)
- POLLUX-Behälter: 1.540 kg je Behälter, Summe Variante B1: 4.663 Mg (3.028 POLLUX-10/-9)
- CASTOR-Behälter 2.000 kg je Behälter, Summe Variante B1/B2: 1.022 Mg (511 CASTOR für Forschungs- und Prototypreaktor-Brennelemente), Summe Variante B2: 2.404 Mg (1.202 CASTOR)
- TN 85, TS28V, TGC36 ca. 2.000 kg je Behälter, Summe Variante B2: ca. 308 Mg (154 TN 85, TS28V, TGC36)

Zusammenfassend ergeben sich aufgrund der Abschirmmaterialien 5.687 Mg Polyethylen für die Endlagervariante B1, 3.446 Mg Polyethylen bzw. Harz für die Variante B2 und 70,97 Mg Polyethylen für die Variante C.

In den radioaktiven Abfällen der CSD-C wird der maximale Anteil an organischen Bestandteilen mit < 0,5 t abgeschätzt.

Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle wird folgendes organisches Modellinventar angenommen (Peiffer et al. 2011):

- Abfallgebinde (Farben und Lacke):
 - MOSAIK-Behälter (= Konrad-Gusscontainer Typ II) 2,2 kg/Behälter
Summe: 13,4 Mg (6.070 Behälter; Mischabfälle, BE-Strukturteile + graphithaltige Abfälle)
Summe: 8,3 Mg (3.770 Behälter: Mischabfälle, graphithaltige Abfälle in Betonbehältern)
 - Betonbehälter Typ I 2,0 kg/Behälter, Summe: 1,6 Mg (800 Behälter: Mischabfälle)

- Konrad Container Typ VI 8,2 kg/Behälter, Summe: 59,2 Mg (7.217 Behälter: Urantails)
- Konrad-Container Typ IV 11,7 kg/Behälter (Stahlblech) Summe: 19,8 Mg (1.695 Behälter: Mischabfälle) (Normalbeton) Summe: 3,7 Mg (313 Behälter: graphithaltige Abfälle)
- Summe Behälter (Variante Graphithaltige Abfälle in MOSAIK-Behältern): 94,0 Mg
- Summe Behälter (Variante Graphithaltige Abfälle in Beton-Behältern): 92,6 Mg
- Abfallmatrices:
 - Bitumen: 136 Mg
 - Kunststoffe: 49 Mg
- Mischabfälle:
 - Zellulose 27,4 Mg
 - EDTA (Fe(NH₄)-EDTA, Na₂-EDTA) 2,8 E-04 Mg
 - sonstige Komplexbildner² 0,25 Mg
 - Tenside 0,12 Mg
 - Sonstige Organika 12,2 Mg
 - Kunststoffe/Öle 374,0 Mg
 - Summe org. Abfälle 413,9 Mg

Summe organisches Material in vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen:

- Variante: Graphithaltige Abfälle in MOSAIK-Behältern: 692,9 Mg
- Variante: Graphithaltige Abfälle in Beton-Behältern: 691, 5 Mg

Das Inventar an organischen Materialien umfasst darüber hinaus auch die Massen der organischen Bestandteile von Einbauten in den Grubebauen (z. B. Kunststoffummante-

² Na₃-Citrat, K₃-Citrat, Na₂-Hydrogencitrat, Na₂-Tartrat, Na₂-Oxalat

lung/Kleber von Ankern und Kabeln). Dabei ist zu berücksichtigen, dass prinzipiell die Möglichkeit besteht, einen Teil der Einbauten rückzubauen und aus den Grubenbauten zu entfernen. Eine Quantifizierung der Stoffe, die in den Grubenräumen verbleiben, ist zurzeit nicht möglich.

Die Schachtausbauten befinden sich oberhalb der Dichtelemente der Schachtverschlüsse. Organische Komponenten werden hier eingesetzt um die Wasserdichtheit des Ausbaus in der Betriebsphase zu gewährleisten. Es handelt sich um eine Schicht aus Polytetrafluorethylen (Teflon) zwischen dem Innenausbau und dem Innenausbaufundament sowie um eine Asphaltdichtung zwischen Außenausbau und Innenbau. Der Ausbau begrenzt daher in der frühen Nachverschlussphase die Druckaufbaurrate des hydrostatischen Druckes auf die Dichtelemente der Schachtverschlüsse. Der spätere sukzessive Ausfall der Dichtfunktion bestimmt, zu welchem Zeitpunkt wie viel Lösung mit welchem Chemismus zum Schachtverschluss zutritt.

29.4 Standortspezifische Auswirkungen

Im Ostflügel des Endlagers für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle befinden sich durch das Abschirmmaterial der Endlagerbehälter große Mengen organischer Stoffe in Form von Polyethylen, die allerdings schwer abbaubar sind. Für die Endlagervariante B1 wurden 5.687 Mg Polyethylen, für die Variante B2 3.446 Mg Polyethylen bzw. Harz und für die Variante C ca. 71 Mg Polyethylen ermittelt.

Im Westflügel mit den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen befinden sich insgesamt ca. 687 Mg organischer Stoffe (Behälterlackierungen, Abfallmatrices und Abfälle), weitere ca. 6 Mg im Ostflügel (MOSAİK-Behälter mit BE-Strukturteilen).

Die organischen Bestandteile beeinflussen das geochemische Milieu und bestimmen außerdem die durch bakterielle Zersetzung gebildeten Gasmengen (hauptsächlich Methan CH_4 und Kohlendioxid CO_2). Der durch die Zersetzung verfügbare Kohlenstoff beeinflusst das Verhältnis des aktiven und des inaktiven Kohlenstoffs im Endlager.

Die in den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen enthaltenen Komplexbildner sind relevant für den Radionuklidtransport.

Von den radioaktiven organischen Spezies sind für die Langzeitsicherheitsanalyse unter Endlagerbedingungen und unter Berücksichtigung der Halbwertszeiten nur C-14

und das organisch gebundene I-129 relevant. Für die Ausbreitung von C-14 ist es relevant, in welchen Verbindungen und Phasen es vorliegt.

29.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

29.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

29.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

29.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

29.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeiten: Das Inventar der Organika ergibt sich aus dem Referenzkonzept und ist somit eine Randbedingung.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die Behältermaterialien (Abschirmmaterial Polyethylen) wirken sich nur über mehrere Ebenen auf die Funktion der Initial-Barriere "Brennelement-Behälter" aus.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist in den Teilsystemen "Nahfeld" (radioaktive Abfälle und Behältermaterialien) sowie "Strecken und Schächte" (Einbauten in der Grube) zu berücksichtigen.

29.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Zersetzung von Organika

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Begründungen:

Abfallmatrix: Unter den Abfällen mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen sind auch Gebinde, bei denen die Abfälle in einer Bitumen- oder Kunststoffmatrix fixiert sind.

Sonstige Endlagergebäude: Diese Behälter sind z. T. lackiert, haben Elastomerdichtungen und enthalten organische Mischabfälle.

Brennelement-Behälter: Die POLLUX- und CASTOR-Behälter sowie die BSK weisen Polyethylen-Abschirmungen auf.

Technische Einrichtungen: Zu den technischen Einrichtungen gehören auch Kunststoffbestandteile sowie Kleber, Farben und Lacke.

Zersetzung von Organika: Die Zersetzung der Organika beeinflusst das Inventar an Organika.

Strahlungsinduzierte Aktivierung: Durch eine strahlungsinduzierte Aktivierung ändert sich das organische Inventar.

Bemerkungen:

Kokillensticking: Aufgrund des Einlagerungskonzeptes (verrohrte Bohrlöcher, Einbringen der Kokillen mit Distanzhaltern) ist ein Kokillensticking nicht zu betrachten. Durch eine Hebung oder Absenkung von Endlagerbehältern findet nur eine räumliche Verschiebung und keine Änderung des Inventars (z. B. Polyethylenstäbe) statt.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Zersetzung von Organika

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Komplexbildung

Begründungen:

Technische Einrichtungen: Die verwendeten Organika beeinflussen die Eigenschaften der technischen Einrichtungen.

Geochemisches Milieu: Das Inventar an Organika beeinflusst das geochemische Milieu im Grubenbau.

Zersetzung von Organika und mikrobielle Prozesse: Außerdem stellen die Organika die Ausgangsmaterialien für verschiedene mikrobielle Prozesse und die Zersetzung dar.

Strahlungsinduzierte Aktivierung: In geringem Umfang findet eine strahlungsbedingte Aktivierung von N zu C14 statt.

Komplexbildung: Die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle enthalten in relevanter Menge auch Komplexbildner wie EDTA, Tenside, Citrate, Tartrate etc., die für den Radionuklidtransport wichtig sind.

29.11 Offene Fragen

- Ermittlung der Massen organischer Bestandteile von Einbauten im Endlagerbergwerk (z. B. Kunststoffummantelung/Kleber von Ankern und Kabeln), die nicht rückgebaut werden.
- Bestimmung der chemischen Form, in der C-14 vorliegt (für Langzeitsicherheitsanalyse)
- Daten der französischen Transport- und Lagerbehälter TN 85, TS28V und TGC36
- Festlegung der Abschirmmaterialien für die BSK und Triple-Packs (Polyethylen oder Graphit)

29.12 Literaturquellen

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Tholen, M. (2012): In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben. DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

30 Inventar: Sonstige Stoffe (2.1.01.04)

30.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Stoffzusammensetzung und die Massen der sonstigen Stoffe in den radioaktiven Abfällen, den Abfallmatrices und Behältermaterialien der Endlagerbinde sowie in den Einbauten in den Grubenbauen (Verfüllmaterial in Erkundungsbohrungen). Zu den sonstigen Stoffen gehören alle Stoffe mit Ausnahme der in anderen FEP beschriebenen Metalle, Organika, Radionuklide, Versatz und Verschlussmaterialien. Das Gesamtinventar ergibt sich unter Berücksichtigung der genannten FEP.

30.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der Nachweis des Grundwasserschutzes vor chemotoxischen Bestandteilen erfolgt nach Wasserrecht (WHG) und wird daher im FEP-Katalog und in der Szenarienanalyse nicht berücksichtigt.

30.3 Sachlage am Standort

Die derzeitigen Planungen sehen die Endlagerung von Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus Leistungsreaktoren in POLLUX-10, verschiedenen CASTOR-Behältern oder in Brennstabkokillen (BSK) vor. Ausgediente Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren werden in verschiedenen CASTOR-Behältern oder in modifizierten BSK eingelagert. Abfälle aus der Wiederaufarbeitung ausgedienter Brennelemente in CSD-V, CSD-B und CSD-C sollen in POLLUX-9, verschiedenen Transport- und Lagerbehältern oder Triple-Packs eingelagert werden (Bollingerfehr et al. 2012, Dörr et al. 2012).

Bei den POLLUX-Behältern wird im Primärdeckel eine Graphitplatte mit ca. 250 kg Gewicht als Neutronenmoderator eingebaut. Daher ergibt sich für die 2.120 POLLUX-10 eine Masse von 530 Mg Graphit und für die 512 POLLUX-9 für Wiederaufarbeitungsabfälle 128 Mg Graphit.

Im Konzept B2 sind in die Schienen der Einlagerungsbohrlöcher Graphitelemente integriert.

Bei den CASTOR-Behältern wird Polyethylen als Moderator eingesetzt (siehe FEP Inventar: Organika). Bei den Brennstabkokillen und Triple-Packs ist noch keine Festlegung erfolgt, ob Polyethylen oder Graphit im Kopfbereich zur Abschirmung eingesetzt werden soll. Falls Graphit eingesetzt werden sollte, ergeben sich 636,12 Mg Graphit für die 7.068 BSK, 26,19 Mg Graphit für die modifizierten BSK sowie 249,75 Mg Graphit für die 2.779 Triple-Packs.

Müller & Ewig (2008) gehen bei Ihrer Abschätzung der Restfeuchte in Brennelement-Behältern von einer Endlagerung defekter Brennstäbe ohne spezielle Konditionierung aus. Weiterhin wurde, da die Anzahl defekter Brennstäbe je Behälter nicht bekannt ist, unterstellt, dass die Brennstäbe aller Brennelemente defekt sind und dass das darin enthaltene Wasser als maximale Restfeuchte zu berücksichtigen ist. Dies ist eine extrem konservative Annahme und führt zu Restfeuchtemengen von mehreren Zehner kg je Behälter:

- POLLUX-10: max. 18 kg (10 DWR-BE) oder 22 kg (30 SWR-BE) Wasser je Behälter
- CASTOR V19: max. 34 kg (19 DWR-BE) Wasser je Behälter
- CASTOR V52: max. 37 kg (52 SWR-BE) Wasser je Behälter
- BSK: max. 5,4 kg (3 DWR-BE) oder 6,5 kg (9 SWR-BE) Wasser je Behälter

Eine realistischere Abschätzung der Restfeuchte in Brennelement-Behältern ergibt, dass die Restfeuchte in den Behältern in erster Linie daraus resultiert, dass die CASTOR-Behälter im Kraftwerk unter Wasser beladen werden (Dörr et al. 2012). Hieraus ergibt sich für CASTOR-Behälter eine Restfeuchte von max. 120 g, für POLLUX-Behälter von max. 60 g und für BSK von max. 20 g je Behälter. Defekte Brennstäbe werden so konditioniert werden, dass aus ihnen keine Restfeuchte freigesetzt werden kann.

In den Brennelement-Strukturteilen sind nach Peiffer et al. (2011) folgende Stoffe enthalten:

- Kohlenstoff 0,8 Mg
- Silizium 8,2 Mg
- Phosphor 0,4 Mg

- Schwefel 0,2 Mg
- Restfeuchte 5,0 Mg

Der Quarzsand, der in die Einlagerungsbohrlöcher zur Verfüllung des Ringraums zwischen Behälter und Verrohrung sowie zur Trennung der Behälter eingebracht wird, hat als getrockneter Sand eine Restfeuchte von ca. 0,2 % (nach Angaben EUROQUARZ: 0,15 %).

Die hochradioaktiven Abfälle (CSD-V) sowie die technologischen Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-B) werden in einer Borosilikatglasmatrix in die Kokillen eingefüllt (ca. 150 l = 410 kg Glasschmelze je Kokille) (Peiffer et al. 2011). Hieraus ergeben sich für die 3.735 CSD-V 1.531,35 Mg Borosilikatglas und für die 308 CSD-B 126,28 Mg Borosilikatglas.

Zu dem Inventar: sonstige Stoffe wird auch Graphit gerechnet, der wesentlicher Bestandteil der Brennelement-Kugeln der Forschungsreaktoren AVR und THTR ist. Zusammenfassend ergibt sich für die Forschungsreaktor-Brennelemente eine Graphitmenge von ca. 173 Mg (AVR ca. 55 Mg, THTR ca. 118 Mg). Außerdem sind aus dem Rückbau der genannten Forschungsreaktoren ca. 2.200 Mg Graphit bzw. graphithaltige Abfälle (Kohlestein) zu entsorgen, die als Moderator- bzw., als Reflektormaterialien eingesetzt wurden.

Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle sind die Baustoffe verschiedener Endlagerbehälter, einige Abfallmatrices sowie Abfälle dem Inventar: Sonstige Stoffe zuzuordnen (Dörr et al. 2011). Durch die Verwendung der Betonbehälter Typ I (400 Behälter aus Normalbeton und 400 Behälter aus Schwerbeton) ergibt sich eine Gesamtmenge von 1.140 Mg Beton, 620 Mg Hämatit und 112 Mg Wasser. Für die Konrad-Container Typ IV aus Normalbeton, die für den Graphit und die graphithaltigen Abfälle vorgesehen sind, ergibt sich eine Gesamtmenge von 2.880 Mg Beton und 229 Mg Wasser. Für die Abfallmatrices sind ca. 8.009 Mg Beton/Zement vorgesehen. Der für Behälter und Abfallmatrices verwendete Beton wird aus Portlandzement hergestellt.

Die Abfälle schließen an sonstigen Stoffen Portlandzement/-beton (1.494 Mg), anorganische Kohlenstoffverbindungen (453 Mg), unspezifizierte Anorganika (2.024 Mg) und Asche (79 Mg) ein.

Ein wichtiger Bestandteil für die Endlagersystementwicklung, der durch die Abfallgebinde in den Westflügel eingebracht wird, ist das Wasserinventar von 6.431 Mg, das durch die Abfälle und das Konditionierungsmaterial eingebracht wird. Es handelt sich überwiegend um gebundenes Wasser (4.849 Mg) sowie um Porenwasser (861 Mg), nicht klassifiziertes Wasser (44 Mg), Kristallwasser (84 Mg), freies Wasser (24 Mg) oder Restfeuchte (569 Mg). Weiterhin werden 112 Mg Wasser durch die Betonbehälter Typ I und 229 Mg Wasser durch die Betoncontainer Typ IV (wenn der Graphit und die graphithaltigen Abfälle in diese Behälter verpackt werden) eingebracht. Bei diesem Wasser handelt es sich überwiegend um gebundenes Wasser.

Alle Erkundungsbohrungen werden im Bergwerk Gorleben mit hygrokopischem Magnesia-Binder, entweder in Form von kaustischem Magnesit oder als Magnesiumoxid zementiert.

Weiterhin wird Salzbeton, Sorelbeton oder Mauerwerk an verschiedenen Stellen des Bergwerks zur Stabilisierung und/ oder Abdichtung des Gebirges eingebracht, so z. B. beim Durchfahren von Anhydritlagen oder im Bohrlochkeller der Einlagerungsbohrlöcher, sowie als Fundamente zum Befestigen von technischen Geräten und Anlagen und zum Fahrbahnbau.

Der Schachtausbau befindet sich oberhalb des Schachtverschlusses und wirkt sich daher nicht unmittelbar auf den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle aus. Die hier eingebrachten Ausbaumaterialien beeinflussen aber den Chemismus der Deckgebirgswässer, die oberhalb der Schachtverschlüsse anstehen, und wirken somit indirekt auf die Initial-Barriere „Schachtverschluss“ ein. Je Schacht wurden etwa 17.521,45 Mg Beton (Portland-Zement, Betongüte B 35, B 45) und 181,75 Mg Betonformsteine (Portland-Zement, Betongüte B55) verbaut (Linkamp & Müller-Hoeppe 2012).

30.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das Inventar der sonstigen Stoffe bzw. deren chemische Zusammensetzung beeinflusst das geochemische Milieu und alle damit verknüpften geochemischen Prozesse, insbesondere die Gasbildung, die Stoffmobilisierung, die Komplexbildung und die Sorption.

Die Restfeuchtigkeit im Innenraum der Brennelement-Behälter führt zu einer Metallkorrosion.

Durch die Endlagergebäude für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle wird in den Westflügel ein Wasserinventar von 6.431 Mg über die Abfallprodukte und 341 Mg über die Betonbehälter eingebracht. Dieses Wasser kann in den entsprechenden Einlagerungsbereichen ggf. zur frühzeitigen Metall- und Zementkorrosion sowie zur Mobilisierung der Radionuklide führen. Dabei ist nicht vollständig klar, in welchem Umfang gebundenes Wasser und Kristallwasser für derartige Prozesse zur Verfügung steht.

Der mit den Abfällen eingebrachte Portlandzement puffert das geochemische Milieu. Die bei einer Zementkorrosion entstehenden Korrosionsprodukte haben eine hohe Sorptionskapazität für Radionuklide. Außerdem können die Zersetzungsprodukte des Portlandzementes die Korrosion des Sorelbetons in den Verschlussbauwerken erhöhen.

Graphit und graphithaltige Abfälle enthalten C-14, das nach der Beschädigung der Behälter mobilisiert und freigesetzt werden kann.

30.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

30.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

30.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

30.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

30.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Inventar an sonstigen Stoffen ergibt sich aus dem Referenzkonzept und ist somit eine Randbedingung.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die hier betrachteten sonstigen Stoffe stammen nicht aus den Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist in den Teilsystemen "Nahfeld" (radioaktive Abfälle und Behältermaterialien), "Strecken und Schächte" (Einbauten in der Grube) sowie "Wirtsgestein" (Erkundungsbohrungen) zu berücksichtigen.

30.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Begründungen:

Abfallmatrix, BE-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Bohrlochverrohrung, Technische Einrichtungen: Abfallmatrices (Zement), das Wandungsmaterial von Betonbehältern, Moderatormaterialien (Graphit) verschiedener Behälter sowie die Technischen Einrichtungen tragen wesentlich zu dem Inventar an sonstigen Stoffen bei.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung: Die Volumenänderung (z. B. Setzung von Sand/Schotter) ändert die Eigenschaften (Porosität, Permeabilität) der sonstigen Stoffe.

Korrosion von Glas oder Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails, mikrobielle Prozesse: Die Korrosion von Abfallmatrices aus Glas, Zement, Graphit oder U_3O_8 , sowie mikrobielle Prozesse beeinflussen die Eigenschaften des Inventars an sonstigen Stoffen.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Sonstige Endlagerbehälter

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Auflockerungszone

Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen

Sorption und Desorption

Kolloide

Komplexbildung

Begründungen:

Sonstige Endlagerbehälter, Technische Einrichtungen: Die Eigenschaften der Sonstigen Endlagerbehälter und der technischen Einrichtungen hängen von ihrer stofflichen Zusammensetzung ab.

Konvergenz, Auflockerungszone, Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen: Das Verfüllmaterial der Erkundungsbohrungen (gehört zum Inventar: Sonstige Stoffe) beeinflusst durch seine mech. Steifigkeit die Konvergenz und Auflockerungszone im Bohrloch.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen: Die Eigenschaften des Inventars: Sonstige Stoffe beeinflussen die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen.

Lösungen im Grubenbau: Mit einigen Abfällen, die Teil des Inventars an sonstigen Stoffe sind, wird Feuchtigkeit in das Endlager eingebracht und trägt daher zu Lösungen im Grubenbau bei.

Geochemisches Milieu: Das Inventar an sonstigen Stoffen beeinflusst das geochemische Milieu.

Auflösung und Ausfällung, Korrosion von Glas, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails, Sorption und Desorption: Das Auftreten von Auflösungs- und Ausfällungsprozessen, der Ablauf und die Intensität verschiedener Korrosionsprozesse sowie eine mögliche Sorption/Desorption an der Matrixoberfläche werden von der Zusammensetzung der Materialien bestimmt.

Mikrobielle Prozesse: Bestimmte Bestandteile der Abfälle (z. B. Nitrate), die zu dem Inventar an sonstigen Stoffen gehören, begünstigen mikrobielle Prozesse. Kolloide, Komplexbildung: Vom Stoffinventar hängen das Auftreten von Kolloiden und die Komplexbildung ab.

30.11 Offene Fragen

- Ermittlung der Massen der sonstigen Stoffe von Einbauten.

- Festlegung der Abschirmmaterialien für die BSK und Triple-Packs (Polyethylen oder Graphit)
- Ermittlung, in welchem Umfang gebundenes Wasser und Kristallwasser für korrosive Prozesse zur Verfügung steht.

30.12 Literaturquellen

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Dörr, S., Filbert, W., Tholen, M. (2011): Beantwortung der Fragen der GRS zu den Betonmengen, den Wasserinhalten und den ggf. vorhandenen Metallanteilen in den Behältern, in den Materialien bei der Konditionierung und in den Abfällen selbst. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben. DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Tholen, M. (2012): In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben. DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Linkamp, M., Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J. (2012): Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer. - Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, AP 9.1.2, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller, W., Ewig, F. (2008): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, ISTECA-1301; Garching.

Müller-Hoeppe, N. (2011a): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichteelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N. (2011b): Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse - Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und A). Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

31 Abfallmatrix (2.1.02.01)

31.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Abfallmatrix wird das Material bezeichnet, in dem die Radionuklide gebunden sind. Dieses FEP beschreibt die möglichen Zusammensetzungen und die daraus resultierenden Eigenschaften der Abfallmatrix.

31.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Radioaktive Abfälle können auf unterschiedliche Weise in einen Behälter eingebracht werden:

- homogen verteilt in einem Fixierungsmaterial (z. B. Glas, Zement, Kunststoff oder Bitumen),
- heterogen eingebettet in einem Fixierungsmaterial (z. B. Zement),
- als kompaktierte, kontaminierte Materialien, vor allem Metallteile
- oder als Brennelemente direkt eingelagert (komplett oder zerlegt).

Der hier verwendete Begriff "Abfallmatrix" geht über international verwendete Definitionen hinaus (z. B. IAEA 2003), da hier nicht nur die Stoffe, in denen die Radionuklide fixiert werden, unter dem Begriff Abfallmatrix subsumiert werden, sondern auch der Brennstoff der direkt endgelagerten abgebrannten Brennelemente. Die Abfallmatrix kann zu einer langandauernden Rückhaltung der Radionuklide in der Matrix führen. Zu berücksichtigen sind dabei die Auslaugbeständigkeit, die Strahlenbeständigkeit, die thermische Stabilität und die mechanischen Eigenschaften (Merz 1979).

31.3 Sachlage am Standort

Die wärmeentwickelnden Abfälle im Ostflügel des Endlagers liegen entweder in verglaster Form oder als direkt endgelagerte, abgebrannte Brennelemente vor (Bollingerfehr et al. 2011, Peiffer et al. 2011):

1. Direkt endgelagerte Brennstäbe werden nicht mit einem Zusatzstoff fixiert. Als Abfallmatrices sind der Brennstoff und die Metallteile der Brennelemente zu betrach-

ten. Die zu betrachtenden Brennstoffe sind UO_2 und MOX für die Brennelemente aus SWR, DWR und WWER-DWR sowie einigen Forschungsreaktoren bzw. Prototypreaktoren (z. B. BER II, FRMZ, KNK II), kugelförmige Brennstoffstoffpartikel aus UO_2 und ThO_2 in THTR- (bzw. AVR-) Graphitkugeln und U_3Si_2 für die Brennelemente aus dem FRM-II.

2. Wärmeentwickelnde Abfälle aus dem Wiederaufarbeitungsprozess werden in einem Borosilikatglas fixiert und in Kokillen (CSD-V) verfüllt. Die Abfallmatrix ist hier der gesamte Glaskörper. Deko- und Spülwässer aus der Wiederaufarbeitung werden ebenfalls verglast und in Kokillen gleicher Abmessung eingebracht (CSD-B).

Im Ostflügel des Endlagers werden neben den hochradioaktiven Abfällen zusätzlich auch mittlerradioaktive Abfälle eingelagert:

3. Mittlerradioaktive, vernachlässigbar wärmeentwickelnde Brennelementhülsen, Strukturteile und sonstige technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (z. B. Glas und Teile des Schmelzers und anderer Einbauten aus der Verglasungszelle). Diese werden kompaktiert und ohne zusätzliches Fixierungsmittel eingelagert.
4. Metallische Strukturteile, die bei der Zerlegung der seit 2005 nicht wiederaufgearbeiteten Brennelemente anfallen. Diese werden ebenfalls kompaktiert und ohne zusätzliches Fixierungsmittel eingelagert.

Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel des Endlagers ist als Fixierungsmittel hauptsächlich Zement vorgesehen, vereinzelt werden auch Bitumen oder Kunststoffe eingesetzt. Direkt eingebracht werden das bei der Isotopenabtrennung anfallende abgereicherte Uran (Urantails, U_3O_8) aus der Urananreicherungsanlage Gronau und graphithaltige Abfälle, die vor allem aus den Moderator- und Reflektormaterialien aus dem THTR und dem AVR stammen.

31.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Matrixmaterialien haben abhängig vom geochemischen Milieu eine charakteristische Zersetzungsrates. Die eingesetzten Matrixmaterialien bestimmen, welche Korrosions- oder Zersetzungsprozesse ablaufen können. Sie beeinflussen damit wiederum das geochemische Milieu. Die in den Matrices vorhandenen Radionuklide werden bei Korrosion bzw. Zersetzung der Matrixmaterialien freigesetzt und gegebenenfalls mobilisiert. Die Auswirkungen der Zersetzungs- bzw. Korrosionsprozesse werden in den je-

weiligen FEP beschrieben: Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Metallkorrosion, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails sowie Zersetzung von Organika.

Die Matrixmaterialien liefern auch einen Beitrag zur Abschirmung der ionisierenden Strahlung.

Einige Matrixmaterialien, z. B. Zement, haben unter bestimmten geochemischen Bedingungen eine Sorptionsfähigkeit und können zur Rückhaltung von Radionukliden beitragen, z. B. Johnson et al. (2000). Bedeutender ist jedoch die Sorption an diversen Korrosionsprodukten (siehe z. B. FEP Korrosion von Glas, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen und Metallkorrosion)

31.5 Zeitliche Beschränkung

Grundsätzlich gibt es keine zeitliche Beschränkung. Die Korrosion und Zersetzung einiger Abfallmatrices, zum Beispiel der zementhaltigen Matrixmaterialien, kann aber sehr schnell ablaufen, so dass die Funktionsdauer der Matrices im Vergleich zum Nachweiszeitraum sehr kurz ist.

31.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

31.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

31.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

31.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Die eingelagerten Abfälle stellen eine Randbedingung des Endlagersystems dar.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist per Definition nur im Nahfeld zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Abfallmatrix selbst ist keine Initial-Barriere, hat aber über die Korrosionsprozesse (geochemisches Milieu, Gasbildung) über mehrere andere FEP Einfluss auf andere Initial-Barrieren. Eine Beeinflussung über mehrere FEP wird als "nicht zutreffend" klassifiziert.

31.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Zersetzung von Organika

Thermische Expansion oder Kontraktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Radioaktiver Zerfall

Begründungen:

Inventar: Metalle: Aus der Art der Metalle ergeben sich die Eigenschaften der Abfallmatrix.

Korrosionsprozesse, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails, Zersetzung von Organika (Bitumen bei nicht wärmeentwickelnden Abfällen): Die Korrosion der Matrix verändert ihre Eigenschaften und Zusammensetzung.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die Wärme aus den Abfällen führt zu einer thermischen Belastung der Matrixmaterialien.

Radiolyse: Radiolyse ändert die chemische Zusammensetzung der Matrixmaterialien.

Radioaktiver Zerfall, Strahlungsinduzierte Aktivierung: Diese Prozesse ändern die Eigenschaften der Matrixmaterialien.

Bemerkungen:

Auflösung und Ausfällung: Prozesse werden bei Matrixkorrosion beschrieben.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Lösungen im Grubenbau

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Zersetzung von Organika

Thermische Expansion oder Kontraktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Sorption und Desorption

Begründungen:

Inventar-FEP: Die verwendeten Matrixmaterialien sind Bestandteil des Inventars.

Lösungen im Grubenbau: Vor allem mit den vWA werden Lösungsmengen ins Grubengebäude gebracht.

Korrosion-FEP, Zersetzung von Organika, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails: Je nach verwendetem Material, verläuft die Korrosion der Matrix unterschiedlich.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Je nach eingesetztem Material verläuft eine Expansion bzw. Kontraktion unterschiedlich ab.

Sorption und Desorption: Zement oder Bitumen beeinflussen Sorptionsprozesse.

Radiolyse, Strahlungsinduzierte Aktivierung: Die Materialien der Abfallmatrices beeinflussen z. B. durch ihre Abschirmung diese Prozesse.

Bemerkungen:

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Bei Kontakt mit Lösungen beeinflussen die Matrixmaterialien das geochemische Milieu indirekt über die Matrixkorrosion.

31.11 Offene Fragen

Spektrum und Menge der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle sind noch nicht bekannt.

31.12 Literaturquellen

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

IAEA (2003): Radioactive Waste Management Glossary, 2003 Edition, IAEA; Wien.

Johnson, E. A., Rudin, M.J., Steinberg, S.M., Johnson, W.H. (2000): The sorption of selenite on various cement formulations. Waste Management 20: 509-516.

Merz, E. (1979): Endlagerformen für hochradioaktive Spaltproduktabfälle. Atomwirtschaft 24, August/September 1979: 409-413.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Weiterführende Literatur:

Brasser, T., Droste, J., Müller-Lyda, I., Neles, J.M., Sailer, M., Schmidt, G., Steinhoff, M. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS- 247; Braunschweig.

Kienzler, B., Loida, A. (2001): Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten - Charakterisierung und Bewertung - Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte. - Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651; Karlsruhe.

32 Brennelement-Behälter (2.1.03.01)

32.1 Definition/Kurzbeschreibung

Es werden die Materialien und Eigenschaften der Endlagerbehälter beschrieben, die den Einschluss der ausgedienten Brennelemente während der Betriebsphase des Endlagers und während der ersten 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers gewährleisten.

32.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Brennelement-Behälter enthalten volatile Radionuklide, die bei einer Beschädigung des Behälters während der Betriebs- und Nachverschlussphase freigesetzt werden. Daher besteht gemäß Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) an die Brennelement-Behälter die Anforderung, dass die Freisetzung radioaktiver Aerosole für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers zu vermeiden ist. Außerdem muss der Brennelement-Behälter gemäß BMU (2010) während der Betriebsphase rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahren im Zuge einer Bergung handhabbar sein. Dabei ist die wahrscheinliche Standortentwicklung zu unterstellen.

Neben den metallischen Behältermaterialien sind bei abgeschirmten Behältern auch andere Materialien, wie z. B. die Moderatorstäbe aus Polyethylen, Bestandteil der Endlagerbehälter. Hinsichtlich der Massen der Behältermaterialien wird auf die FEP Inventar: Metalle, Inventar: Organika und Inventar: Sonstige Stoffe verwiesen.

CASTOR-Transport- und Lagerbehälter sind Standardbehälter für die Zwischenlagerung von ausgedienten Brennelementen in deutschen zentralen oder lokalen Zwischenlagern. Es gibt eine Vielzahl von Behältertypen für die verschiedenen Leistungsreaktor- und Forschungsreaktor-Brennelementen (z. B. CASTOR V/19 (für 19 DWR-BE), CASTOR V/52 (für 52 SWR-BE), CASTOR 440/44 (für 84 WWER-BE), CASTOR THTR/AVR etc.). Die Option der direkten Endlagerung von CASTOR-Transport- und Lagerbehältern in einem Salzstock wurde in einem FuE-Projekt im Auftrag der GNS untersucht (Graf et al. 2012).

Der POLLUX ist ein Endlagerbehälter, der für die direkte Endlagerung von ausgedienten Brennelementen im Salz entwickelt wurde. Es wurden bisher nur wenige Prototy-

pen des POLLUX-10 (für DWR-BE) für die Erprobung und das Zulassungsverfahren gefertigt. Falls dieses Konzept später für Endlagerung verwendet werden sollte, müsste analog zum CASTOR, eine ganze Behälterfamilie für die verschiedenen Brennelementtypen und die Wiederaufarbeitungsabfälle entwickelt werden: z. B. POLLUX-10 für 10 DWR-BE, POLLUX-30 (für 30 SWR-BE), POLLUX-25 (für 25 WWER-BE), POLLUX-9 (für 9 CSD-V, 9 CSD-C oder 9 CSD-B). Für die meisten dieser Behälter gibt es zurzeit nur Konzepte. Da bisher nur POLLUX-10-Behälter gebaut wurden, wird diese Behältertyp-Bezeichnung im Projekt VSG vereinfachend für alle POLLUX-Behälter für Leistungsreaktor-BE verwendet. In analoger Weise wird die Bezeichnung "POLLUX-9" für alle POLLUX-Behälter verwendet, die 9 Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen aufnehmen können.

Für die Bohrlochlagerung in Salz wurde eine Brennstabkokille (BSK) geplant, die die Brennstäbe von 3 DWR-BE oder 9 SWR-BE aufnehmen kann. Weiterhin wurde ein Overpack mit gleichen Abmessungen geplant, der 3 Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen aufnehmen kann (Triple-Pack), sowie modifizierte BSK für Forschungsreaktor-BE. Das im FuE-Projekt "DENKMAL" erprobte Behälter- und Einlagerungskonzept berücksichtigte - entsprechend den damaligen regulatorischen Vorgaben - noch keine Rückholung der Behälter (Graf et al. 2009). Entsprechend den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) war nunmehr eine Anpassung des Konzeptes an die Rückholung erforderlich. Zu diesem Zweck wurde eine Bohrlochverrohrung vorgesehen sowie die Form und die Wandstärke der Kokillen modifiziert. Da diese Kokillen lediglich eine Weiterentwicklung der alten Kokillenformen darstellen, wurden die Bezeichnungen "BSK", "modifizierte BSK" und "Triple-Pack" beibehalten.

32.3 Sachlage am Standort

Im Rahmen des Projektes VSG wurden für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente die folgenden Varianten betrachtet:

- die Streckenlagerung von POLLUX-10-Behältern sowie CASTOR-Behältern für Forschungs- und Prototypreaktor-Brennelemente (Variante B1)
- die Lagerung der Brennelemente in Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern als Differenzbetrachtung (Variante B2)
- die Lagerung von BSK-Kokillen in vertikalen Bohrlöchern (Variante C).

Für die Variante B1 sind insgesamt 2.120 POLLUX-10-Behälter vorgesehen, von denen 1.398 mit DWR-Brennelementen, 520 mit SWR-Brennelementen und 202 mit WWER-DWR-Brennelementen beladen sind. Die POLLUX-Behälter für die verschiedenen Brennelementtypen sind in ihren äußeren Abmessungen identisch und unterscheiden sich nur in ihren inneren Strukturen zur Aufnahme der Brennstäbe.

Die POLLUX-Behälter haben eine Länge von 5.517 mm, einen Durchmesser von 1.560 mm, ein Gebindevolumen von 10,55 m³ und eine max. Gebindemasse von 65 Mg. Sie bestehen aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter ist, wie der Primär- und Sekundärdeckel, aus Feinkornbaustahl (Werkstoff Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)) gefertigt und hat eine Wandstärke von 160 mm. Er wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von 2 DWR-BE, 6 SWR-BE oder 5 WWER-BE eingesetzt werden kann. Die Büchsen und der Korb sind aus Edelstahl (1.4541) mit Borstahlblech beplankt, z. T. mit Kupfer beschichtet. Der Außenbehälter ist aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Da er keine Dichtfunktion zu übernehmen hat, wird er mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen (Hostalen oder Lupolen) zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt. Zur Handhabung sind am Behälterkörper oben und unten Tragzapfen aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 und zur Wärmeabfuhr Kühlrippen aus Aluminium (EN AW 6060) angebracht.

Für die Endlagerung der Forschungs- und Prototypreaktor-Brennelemente sind 457 Behälter des Typ CASTOR THTR/AVR, 4 CASTOR KNK und 50 CASTOR MTR 2 vorgesehen. Die CASTOR-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper (Höhe 3.263 mm, Durchmesser: 1.380 mm, Wandstärke: 370 mm, max. Gebindegewicht: 26 Mg) aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040) und verfügen über einen Primärdeckel aus Schmiedestahl (TSE 355) und einen Sekundärdeckel aus unlegiertem Stahl (Werkstoff St 52-3). Zur Handhabung ist der Behälter oben und unten jeweils mit zwei Tragzapfen aus Schmiedestahl (TSE 355) ausgerüstet. Durch entsprechende Tragkörper wird der Behälterinnenraum an die Aufnahme der jeweiligen Brennelement-Typen angepasst und enthält entweder 2.100 THTR-Brennelemente oder 1.900 AVR-Brennelemente.

Der CASTOR MTR 2 besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit Boden (Höhe: 1.631 mm, Durchmesser: 1.430 mm, Wandstärke: 354 mm, max. Gebindegewicht: 15,8 Mg) aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040). Das obere Zylinderende wird durch einen 280 mm starken Primärdeckel (Werkstoff 1.0566 oder 1.4313) und einen 60 mm starken Sekundärdeckel (Werkstoff 1.0566) verschlossen. Die Brennelemente werden im Behälterinnenraum in Tragkörben aus Aluminium angeordnet.

Bei der Differenzbetrachtung (Variante B2) werden die POLLUX-BE-Behälter durch 1.097 Transport- und Lagerbehälter (TLB) der Typen CASTOR V/19 (736 Behälter), CASTOR V/52 (300 Behälter) und CASTOR 440/84 (61 Behälter) ersetzt.

Der CASTOR V/19 ist für den Transport und die Lagerung von bis zu 19 DWR-Brennelementen ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 39 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.900 PBq. Der Behälter besteht aus einem monolithischen Körper aus Sphäroguss (EN-GJS-400-15U) in Form eines einseitig geschlossenen Hohlzylinders (Länge: 5.862 mm, Durchmesser: 2.436 mm, Wanddicke: 418 mm), einem Tragkorb zur Aufnahme der Brennelemente und dem übereinander angeordneten Verschlussystem (Primär- und Sekundärdeckel) sowie einer Schutzplatte. An der äußeren Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Verbesserung der passiven Wärmeabfuhr Radialrippen eingearbeitet. Primär- und Sekundärdeckel sind aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 gefertigt und werden mit dem Behälterkörper fest verschraubt. Außerdem sind zur Handhabung oben und unten am Behältermantel jeweils paarweise Tragzapfen angeschraubt. Die max. Gebindemasse beträgt 123,6 Mg.

Der CASTOR V/52 ist für den Transport und die Lagerung von bis zu 52 SWR-Brennelementen ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 40 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.730 PBq. Der Behälter entspricht hinsichtlich Behälteraufbau, Verschlussystem, Neutronenabschirmung, Handhabung und Tragzapfen dem CASTOR V/19. Lediglich die Abmessungen (Länge 5.451 mm) und Gewichte (max. 121 Mg) sowie der Tragkorb weichen von denen des CASTOR V/19 ab.

Der CASTOR 440/84 ist für den Transport und die Lagerung von bis zu 84 DWR-Brennelementen des Typs WWER 70 oder WWER 440 ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 21 kW. Der Behälter entspricht hinsichtlich Behälteraufbau, Verschlussystem, Neutronenabschirmung, Handhabung und Tragzapfen dem CASTOR V/19. Lediglich die Abmessungen (Länge 4.080 mm, Durchmesser

2.660 mm) und Gewichte (max. 106,9 Mg) sowie der Tragkorb weichen von denen des CASTOR V/19 ab.

Für die Endlagerung von Leistungsreaktor-Brennelementen in CASTOR-Behältern ist zur Gewährleistung der Unterkritikalität eine Verfüllung des Behälterschachtes mit Magnetit oder abgereichertem U_3O_8 vorgesehen (Chernykh et al. 2011).

Für das Bohrlochkonzept werden die Brennelemente der Leistungsreaktoren in 7.068 BSK-Kokillen und die Forschungsreaktor-Brennelemente in 229 BSK AVR/THTR, 5 BSK KNK und 56 BSK MTR eingelagert.

Die Brennstabkokille BSK wurde als Alternative zum POLLUX-Behälter zur Aufnahme der gezogenen Brennstäbe von 3 DWR-Brennelementen oder 9 SWR-Brennelementen (in zwei Brennstabbüchsen aus Edelstahl 1.4541) entworfen (Bollingerfehr et al. 2011, Bollingerfehr et al. 2012). Außerdem kann sie die gezogenen Brennstäbe von 7,5 WWER-Brennelementen aufnehmen. Die BSK hat eine Länge von 5.060 mm, einen Durchmesser von 520 mm (oben) und 470 mm (unten), ein Gebindenvolumen von $0,72 \text{ m}^3$ und eine max. Gebindemasse von 5.266 kg. Sie besteht aus einem konischen Behälterkörper mit 19,5 mm (unten) und 44,5 mm (oben) Wandstärke und einem angespressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel der BSK aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210). Am oberen Ende des Behälterschachtes wird eine 285 mm starke Platte aus Polyethylen (oder Graphit) zur Neutronenabschirmung eingebracht bevor der Innenraum durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen wird. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters weist der Deckel einen Tragpilz auf.

Zur Aufnahme der Brennelement-Kugeln aus AVR und THR in Kannen sind modifizierte BSK vorgesehen. In Analogie zu den Planungen (Bollingerfehr et al. 2011, Bollingerfehr et al. 2012) ist der Durchmesser der Kokille um 215 mm zu erweitern. Material, Wandstärke und Länge der Kokille bleiben unverändert. Die max. Gebindemasse wird ca. 5,66 Mg betragen.

32.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Abschirmung der POLLUX- und CASTOR-Behälter durch Polyethylenstäbe und -platten sowie der Kopfbereiche der Brennstabkokillen ist vor allem für den Strahlenschutz des Betriebspersonals während der Betriebsphase relevant. In der Nachverschlussphase verhindert die Abschirmung strahlungsinduzierte Aktivierungen und Radiolyse im Wirtsgestein. In der Nachverschlussphase kann das Polyethylen nach einer mikrobiellen Degradation zur Gasbildung beitragen.

Entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU (2010) werden die Brennelement-Behälter so ausgelegt, dass sie während der Betriebsphase rückholbar und für 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers handhabbar bleiben. Dabei ist die wahrscheinliche Standortentwicklung zu unterstellen. Außerdem soll die Integrität der Behälter während dieser Zeit so weit erhalten bleiben, dass eine Freisetzung volatiler radioaktiver Aerosole nicht zu besorgen ist.

Für die dickwandigen POLLUX- und CASTOR-Behälter ist nachzuweisen, dass sie nicht nur betrieblichen Störfällen sondern auch dem Gebirgsdruck standhalten. Bei den Brennstab-Kokillen wird die mechanische Stabilität gegen den Gebirgsdruck über 500 Jahre durch die Bohrlochverrohrung gewährleistet.

Die Korrosionsraten der metallischen Behältermaterialien und die damit verbundene Gasbildung sind abhängig von Art und Menge der verfügbaren Lösungen. Bei der wahrscheinlichen Standortentwicklung sind die verfügbaren Lösungsmengen begrenzt und werden während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht zu einer Zerstörung der Behälter durch Flächenkorrosion führen. Eine mögliche Lochfraßkorrosion ist separat zu bewerten. Auch bei stärkerem Lösungszutritt wird die Funktionsdauer der POLLUX- und CASTOR-Behälter aufgrund der großen Wandstärken bei Annahme einer Flächenkorrosion einige 1.000 Jahre betragen (Müller & Tholen 2009).

Das Temperaturfeld im Nahbereich der Einlagerungsfelder wird in geringem Maße auch durch die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Behältertypen beeinflusst.

32.5 Zeitliche Beschränkung

Die Brennelement-Behälter werden gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) so ausgelegt, dass sie während der Betriebszeit rückholbar und über 500 Jahre handhabbar sind.

Für den restlichen Nachweisraum bestehen keine Anforderungen an die Integrität der Behälter. Entsprechend der Behälterauelegung und den erwarteten Standortbedingungen (geringe Lösungsmengen im Ostflügel des Endlagers) ist davon auszugehen, dass die Behälter noch über längere Zeiträume intakt bleiben werden (Müller & Tholen 2009). Noch unklar ist, in wie weit die Lochfraßkorrosion die Funktionsdauer der POLLUX-10- oder CASTOR-Behälter begrenzen wird. Daher wird z. Z. unterstellt, dass die Behälter zu späten Zeiten sukzessive ausfallen werden.

Die Kokillen für die Bohrlochlagerung können durch Korrosion oder mechanische Einwirkungen beeinträchtigt werden. Durch die Restfeuchte in der Sandfüllung der Bohrlochverrohrungen wird eine begrenzte Korrosion auch bei intakter Bohrlochverrohrung stattfinden. Da an die Dichtheit der Verrohrung keine Anforderungen bestehen, kann auch Feuchtigkeit von außen in den Innenraum der Verrohrung eindringen und zu weiterer Korrosion führen. Es ist davon auszugehen, dass die Lochfraßkorrosion der begrenzende Faktor für die Funktionsdauer der BSK sein wird.

32.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

32.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

32.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

32.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das FEP stellt eine Randbedingung dar. Die Behältermaterialien und -eigenschaften wurden für das Referenzkonzept festgelegt.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist im Teilsystem "Nahfeld" zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das FEP beschreibt die Behälter-Eigenschaften, von denen die Konsequenzen externer Einwirkungen auf den Behälter abhängen. Aus dem FEP ergibt sich daher keine direkte Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren.

32.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Versagen eines Brennelement-Behälters

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Salzgruskompaktion

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Zersetzung von Organika

Thermische Expansion oder Kontraktion

Radiolyse

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Inventar Metalle: Die Art der Metalle beeinflusst die Behältereigenschaften.

Versagen eines Brennelement-Behälters: Falls es zu einem Versagen kommt, so ändern sich die Behältereigenschaften.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: falls die Verrohrung durch mechanische Einwirkung deformiert wird, können auch die Behälter im Inneren beeinträchtigt werden.

Salzgruskompaktion: In Einlagerungsstrecken hängt die Übertragung der Gebirgsspannung auf die Behälter von der Salzgruskompaktion ab.

Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Diese Prozesse verändern die Eigenschaften der Behälter.

Zersetzung von Organika: Dieser Prozess betrifft die PE-Abschirmungen der POLLUX, CASTOR und BSK und wirkt sich daher auf Behälterkomponenten aus.

Thermische Expansion und Kontraktion: Das thermische Verhalten der Behältermaterialien wirkt sich auf die Behältereigenschaften aus, ist aber bei der Behälterauslegung berücksichtigt worden.

Radiolyse: Durch Radiolyse kann die Restfeuchte im Behälter dissoziiert werden. Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen: Durch die Spannungen im Versatz werden die Gebirgsspannungen auf die Behälter übertragen.

Bemerkungen:

Konvergenz: wirkt nicht direkt auf die Behälter, sondern indirekt über die Spannungsänderungen im Versatz (Streckenlagerung) oder nur auf die Bohrlochverrohrung (Bohrlochlagerung).

Sorption und Desorption: Die Sorption und Desorption von Stoffen beeinflusst nicht signifikant die Behälteroberflächen.

Mikrobielle Prozesse im Grubenbau: Diese Prozesse sind nicht zu berücksichtigen, da sie nur indirekt durch die Beeinflussung des geochemischen Milieus und die Behälterkorrosion auf die Behälter einwirken.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Versagen eines Brennelement-Behälters

Salzgruskompaktion

Kanalisation im Salzgrus

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Thermische Expansion oder Kontraktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Sorption und Desorption

Hebung und Absinken von Endlagerbehältern

Begründungen:

Inventar Metalle, Organika, Sonstige Stoffe: Die Behältermaterialien bestimmen wesentlich die Inventare an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen.

Versagen eines BE-Behälters: Durch die Behältereigenschaften werden die Prozesse bestimmt, die zu einem Behälterversagen führen können. So hängt von der Materialwahl ab, bei welchen Umweltbedingungen es zu einer Behälterkorrosion bzw. zu einer Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme kommen kann.

Salzgruskompaktion, thermische Expansion und Kontraktion: Die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Behälters beeinflussen die Salzgruskompaktion und die thermische Expansion und Kontraktion.

Kanalisation im Salzgrus: An den Behältern bilden sich Druckschatten aus, die in direkter Umgebung der Behälter zu einer Kanalisation im Salzgrusversatz führen können.

Strahlungsinduzierte Aktivierung: Das Abfallinventar in den Behältern sowie die Behältereigenschaften beeinflussen die Intensität der strahlungsinduzierten Aktivierung.

Radiolyse: Die Intensität der Radiolyse des umgebenden Steinsalzes hängt davon ab, in welchem Umfang die eingelagerten Behälter abgeschirmt sind.

Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen: Von den mechanischen Eigenschaften des Behälters hängt der Stückdruck ab, der den Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen in Versatz und Gebirge entgegenwirkt.

Sorption und Desorption: Die Behältermaterialien bestimmen die Sorptionseigenschaften. Hebung oder Absenkung der Endlagerbehälter: Diese Prozesse werden einerseits durch die Behältermaterialien und ihr spezifisches Gewicht sowie andererseits durch die Form der Endlagerbehälter beeinflusst.

Bemerkungen:

Geochemisches Milieu: Das geochemische Milieu wird nur indirekt über Stofffreisetzungen bei Korrosionsprozessen an den Behältern beeinflusst und daher hier nicht berücksichtigt.

32.11 Offene Fragen

- Behälterentwicklung (POLLUX, BSK für die unterschiedlichen Brennelementtypen)
- Systematisierung und Zusammenstellung der vorliegenden Informationen zu Korrosionsraten der Behältermaterialien der Endlagergebäude.
- Entwicklung von korrosionsresistenten Behältermaterialien.
- Auslegung der Behälter für die Zulassung
- Ausfallwahrscheinlichkeit

32.12 Literaturquellen

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Chernykh, M., Graf, R., Filbert, W. (2011): Kritikalitätssicherheit von CASTOR® - Behältern während der Endlagerung. - Jahrestagung Kerntechnik, 17.-19. Mai 2011; Berlin.

Graf, R., Filbert, W., K.J. Brammer, Bollingerfehr, W. (2009): Disposal of Spent Fuel from German Nuclear Power Plants. ICM 2009-16028. The 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, October 11-15, 2009, Liverpool Arena & Conference Centre; Liverpool.

Graf, R., Brammer, K.J., Filbert, W. (2012): Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern - ein umsetzbares technisches Konzept. - Jahrestagung Kerntechnik 2012; Stuttgart.

Müller, W., Tholen, M. (2009): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. - atw, 54. Jg., Heft 5: 303-306.

Technical committee meeting on technologies for gas cooled reactor decommissioning, fuel storage and waste disposal. Juelich (Germany) 8-10 Sep 1997, International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria), IAEA-TECDOC-1043, pp: 171-177.

33 Sonstige Endlagerbehälter (2.1.03.02)

33.1 Definition/Kurzbeschreibung

Es werden die Materialien und Eigenschaften der Endlagerbehälter für z. T. wärmeentwickelnde Wiederaufarbeitungsabfälle und sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung beschrieben, die den Einschluss dieser Abfälle während der Betriebsphase des Endlagers gewährleisten. Brennelement-Behälter werden hier nicht betrachtet.

33.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Im Unterschied zu den Brennelement-Behältern enthalten die Behälter mit verglasten hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V) keine volatilen Radionuklide. Daher trifft die entsprechende Anforderung bezüglich der Rückhaltung volatiler radioaktiver Aerosole gemäß BMU (2010) auf diese Behälter nicht zu. Die Behälter müssen aber während der Betriebsphase rückholbar eingelagert werden und während der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase, bei Annahme einer wahrscheinlichen Standortentwicklung, handhabbar sein (Bergungsoption). Für Behälter, die radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung enthalten, bestehen keine diesbezüglichen Anforderungen (BMU 2010).

Da bei der Endlagerung im Salz im Hinblick auf die Nachverschlussphase keine weitergehenden Anforderungen an die sonstigen Endlagerbehälter im Hinblick auf den Einschluss der radioaktiven Stoffe bestehen, erfolgt die Auswahl der Behältermaterialien sowie die Auslegung nach den Herstellungsbedingungen (Glasschmelze, Dekontamination etc.) und betrieblichen Anforderungen, die sich einerseits aus dem Regelwerk (Atomgesetz bzw. Strahlenschutzverordnung, Verkehrsrecht etc.) und andererseits aus technischen Anforderungen ableiten. Außerdem muss der Behälter mit der Abfallmatrix kompatibel sein. Neben den metallischen Behältermaterialien sind bei abgeschirmten Behältern auch andere Materialien, wie z. B. die Moderatorstäbe aus Polyethylen oder bei den Abfallgebinden mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle auch Abschirmungen aus Zement bzw. Beton, Bestandteil der Endlagerbehälter. Hinsichtlich der Massen aller Behältermaterialien wird auf die FEP Inventar: Metalle, Inventar: Organika und Inventar: Sonstige Stoffe verwiesen.

CASTOR-Transport- und Lagerbehälter sind Standardbehälter für die Zwischenlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung im Zwischenlager Gorleben. Es gibt zwei entsprechende CASTOR-Typen für eine unterschiedliche Zahl an Kokillen (CASTOR HAW 20/28 CG, CASTOR HAW 28M). Außerdem wurde eine geringe Zahl an französischen TLB (TN 85, TS28V, TGC36) eingelagert. Die Option der direkten Endlagerung von CASTOR-Transport- und Lagerbehältern in einem Salzstock wurde in einem FuE-Projekt ("DIRECT") im Auftrag der GNS untersucht (Graf et al. 2012).

Für die Bohrlochlagerung ist eine rückholbare Kokille vorgesehen, die - abgesehen von den Innenstrukturen - baugleich mit der BSK ist (Bollingerfehr et al 2012). Diese Kokille kann drei Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen aufnehmen und wird daher als „Triple-Pack“ bezeichnet. Die Kokille entspricht in ihrer Auslegung den Anforderungen an die Rückholbarkeit und Bergbarkeit (BMU 2010).

33.3 Sachlage am Standort

In folgenden betrachteten Endlagerkonzepten sind Endlagerbehälter für verglaste hoch radioaktive Abfälle (HAW) und Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2011a, Bollingerfehr et al. 2011b, Bollingerfehr et al. 2012, Peiffer et al. 2011):

- Streckenlagerung von CSD-V (= HAW-Kokillen), CSD-B und CSD-C im POLLUX-9 und BE-Strukturteile in MOSAIK-Behältern (Variante B 1)
- Bohrlochlagerung von CASTOR HAW 20/28 CG, CASTOR HAW 28M, TN85, TS28V und TGC36 (Variante B 2)
- Bohrlagerung von CSD-V, CSD-B und CSD-C sowie verpressten Strukturteilen in Triple-Packs (Variante C)
- Kammerlagerung von MOSAIK-Behältern des Typs II, Konrad-Containern der Typen IV und VI (Variante A)

Endlagervariante B1:

Für die Variante B 1 ist die Einlagerung von 3.735 CSD-V in 415 POLLUX-9, 308 CSD-B in 35 POLLUX-9, 4.104 CSD-C in 456 POLLUX-9 sowie 2.620 MOSAIK-Behältern (Gussbehälter Typ II) vorgesehen.

Die als Primärbehälter für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung verwendeten CSD-Kokillen haben eine Länge von 1338 mm, einen Durchmesser von 430 mm, eine Wandstärke von 5 mm und werden aus dem Edelstahl Z 15 CN 24.13 (= Werkstoff 1.4833) gefertigt.

Der POLLUX-9 hat eine Länge von 5.517 mm, einen Durchmesser von 1.560 mm, ein Gebindevolumen von 10,55 m³ und eine max. Gebindemasse von 65 Mg. Er besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter ist, wie der Primär- und Sekundärdeckel, aus Feinkornbaustahl (Werkstoff Stahl 15MnNi6.3 (1.6210)) gefertigt und hat eine Wandstärke von 160 mm. Er wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in drei Tragkörbe unterteilt, in die jeweils drei CSD-C, CSD-B oder CSD-V-Kokillen übereinander eingesetzt werden können. Der Außenbehälter ist aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff EN-GJS-400-15U (0.7040)) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Da er keine Dichtfunktion zu übernehmen hat, wird er mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyethylen (Hostalen oder Lupolen) zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt. Entsprechend dem Inventar ist die Anzahl der Moderatorstäbe höher als beim POLLUX-10. Zur Handhabung sind am Behälterkörper oben und unten Tragzapfen aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 und zur Wärmeabfuhr Kühlrippen aus Aluminium (EN AW 6060) angebracht.

MOSAIK-Behälter sind in der Endlagervariante B1 für die Einlagerung von kompaktierten Strukturteilen aus der Brennelement-Konditionierung vorgesehen. Es handelt sich um dickwandige, zylindrische Gussbehälter aus GGG40 mit eingesetzten oder aufliegenden Deckeln aus demselben Material, die mit dem Behälterkörper verschraubt oder verschweißt sind. Durch die Verwendung einer Elastomerdichtung haben die Behälter während der Betriebsphase eine Dichtheit von 1 E-4 hPa*l/s und verhindern dann eine Freisetzung volatiler Radionuklide. Für die Handhabung sind entsprechende Anschlagmöglichkeiten an den Behältern vorhanden. Entsprechend den Radionuklidinventaren werden die MOSAIK-Behälter für Brennelement-Strukturteile zur Abschirmung zusätzlich eine 120 mm starke Bleiauskleidung aufweisen. Die Behälter werden einen Durchmesser von 1.060 mm und eine Höhe von 1.500 mm sowie ein max. Gewicht von 9,89 Mg aufweisen.

Endlagervariante B2:

Für die Variante B2 sind die Einlagerung von 1.580 CSD-V in 79 CASTOR HAW 20/28 CG, 1.153 CSD-V bzw. 308 CSD-B in 42 bzw. 11 CASTOR HAW28M, 336 CSD-V in 12 TN85, 28 Kokillen in 1 TS28V sowie 4.104 CSD-C Kokillen in 114 TGC36 vorgesehen. Da in den CASTOR-Behältern komplette Brennelemente endgelagert werden, entfällt bei diesem Konzept die Entsorgung von BE-Strukturteilen aus der BE-Konditionierung.

Der CASTOR HAW 20/28 CG besteht aus einem dickwandigen zylindrischen Sphärogusskörper (Werkstoff EN-GJS-400-15U, Länge 5.933 mm, Durchmesser 2.330 mm, max. Gewicht 110 Mg) mit eingearbeiteten Radialrippen an der Behälteroberfläche. Ein Doppeldeckelsystem aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 mit Metall- und Elastomerdichtungen wird mit dem Behälterkörper fest verschraubt. Am Kopf- und Fußende des Behältermantels sind Tragzapfen zur Handhabung angebracht. Zwei verschiedene Tragkorbkonstruktionen ermöglichen die Aufnahme von 20 oder 28 Kokillen.

Der Behälter CASTOR HAW 28 M ist für die Aufnahme von 28 Kokillen mit verglastem hochradioaktivem Abfall (CSD-V) oder verglastem mittelradioaktivem Abfall (CSD-B) ausgelegt. Die zulässige Gesamtwärmeleistung beträgt 56 kW und die zulässige Gesamtaktivität 1.270 PBq. Der Behälter besteht aus einem dickwandigen zylindrischen Sphärogusskörper (Werkstoff EN-GJS-400-15U, Länge: 5.800 mm, Durchmesser 2.430 mm, max. Gewicht 109 Mg). Zur Neutronenabschirmung sind in der Behälterwand in Bohrungen Stangen aus Polyethylen angeordnet. Zusätzlich sind Abschirmelemente im Korb, eine Moderatorplatte im Bodenbereich und eine mehrteilige Moderatorplatte an der Oberseite des Primärdeckels angebracht. Das Doppeldeckelsystem aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 mit Metall- und Elastomerdichtungen wird mit dem Behälterkörper fest verschraubt. An der äußeren Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Verbesserung der passiven Wärmeabfuhr Radialrippen eingearbeitet. An der boden- und deckelseitigen Mantelfläche des Behälterkörpers sind zur Handhabung und zur Fixierung des Behälters beim Transport jeweils paarweise Tragzapfen angebracht.

Der Transport- und Lagerbehälter TS 28 V besteht aus einem Grundkörper mit angeschweißtem Boden aus Schmiedestahl mit einem Außenmantel aus Stahl, der durch Kupferstege am Grundkörper befestigt ist. Die Länge beträgt 6.100 mm und der Durchmesser 2.600 mm. Das Doppeldeckelsystem besteht aus Schmiedestahl mit Metalldichtungen und edelstahlplattierten Dichtflächen. Durch zwei austauschbare Ein-

satzkörbe kann der Behälter 20 oder 28 Kokillen aufnehmen. Das maximale Gebindengewicht beträgt 112 Mg.

Der Behälter TN 85 ist für den Transport und die Zwischenlagerung von jeweils 28 Kokillen mit verglastem hochradioaktivem Abfall (CSD-V bzw. HAW-Kokillen) entwickelt worden. Er hat eine Länge von 6.013 mm, einen Durchmesser von 2.319 mm und ein max. Gewicht von 110 Mg. Behälterkörper und -boden bestehen aus Schmiedestahl. Als Kühlrippen werden 40 Aluminiumprofile mit je drei Kühlrippen verwendet, die mit dem Behälterkörper verschraubt sind. Zwischen dem Behälterkörper und den Aluminiumprofilen werden zur Abschirmung Harz und Blei eingesetzt, die durch eine Stahlplatte voneinander getrennt sind. Der Behälter wird mit einem Doppeldeckeldichtsystem verschlossen.

Der Behälter TGC 36 befindet sich zurzeit in der Entwicklung. Er wird derzeit für die Aufnahme von 36 Kokillen mit kompaktierten mittelradioaktiven Brennelement-hülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C) ausgelegt. Details zum Behälterdesign liegen zurzeit noch nicht vor.

Endlagervariante C:

Für die Endlagervariante C ist die Einlagerung von 3.729 CSD-V-Kokillen in 1.245 Triplepacks, 308 CSD-B in 103 Triplepacks, 4.104 CSD-C in 1.368 Triplepacks sowie 874 Triplepacks mit BE-Strukturteilen vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2012, NSE 2011). Beim Triplepack handelt es sich um einen Overpack aus Edelstahl, der 3 CSD-V, CSD-B oder CSD-C bzw. kompaktierte Strukturteile aus der BE-Konditionierung aufnehmen kann. Er hat eine Länge von 5.100 mm, einen Durchmesser von 530 mm (oben) und 480 mm (unten), ein Gebindenvolumen von 0,72 m³ und eine max. Gebindemasse von 5,3 Mg. Er besteht aus einem zylindrischen Behälterkörper mit 19,5 mm Wandstärke und einem angespressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210). Am oberen Ende des Behälterschachtes wird eine 285 mm starke Platte aus Polyethylen (oder Graphit) zur Neutronenabschirmung eingebracht bevor der innere Schachtraum durch Verschrauben mit einem Primärdeckel verschlossen wird. Über den Primärdeckel wird ein Sekundärdeckel aufgelegt, der mit dem Behälterkörper gasdicht verschweißt wird. Zur Handhabung des Behälters weist der Schweißdeckel einen Traggilz auf.

Endlagervariante A:

Für die Endlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Variante A) sind vier Behältertypen vorgesehen: 3.450 MOSAIK-Behälter (= Gussbehälter Typ II, optional: 1.150, falls graphithaltige Abfälle in Container-Typ IV), 800 Betonbehälter Typ I, 1.695 Behälter Container-Typ IV (optional: 3.995, falls graphithaltige Abfälle ebenfalls in Container-Typ IV) und 7217 Behälter des Container-Typs VI (Bollingerfehr et al. 2012, Dörr et al. 2011).

MOSAIK-Behälter sind in der Endlagervariante A für die Einlagerung eines Teils der Mischabfälle und (optional) für graphithaltige Abfällen vorgesehen. Es handelt sich um dickwandige, zylindrische Gussbehälter aus GGG40 mit eingesetzten oder aufliegenden Deckeln aus demselben Material, die mit dem Behälterkörper verschraubt oder verschweißt sind. Durch die Verwendung einer Elastomerdichtung haben die Behälter während der Betriebsphase eine Dichtheit von 1 E-4 hPa-l/s und verhindern dann eine Freisetzung volatiler Radionuklide. Für die Handhabung sind entsprechende Anschlagmöglichkeiten an den Behältern vorhanden. Entsprechend den Radionuklidinventaren werden die MOSAIK-Behälter für Brennelement-Strukturteile zur Abschirmung zusätzlich eine 120 mm starke Bleiauskleidung aufweisen. Die Behälter werden einen Durchmesser von 1.060 mm und eine Höhe von 1.500 mm sowie ein max. Gewicht von 9,89 Mg aufweisen.

Für die Einlagerung eines anderen Teils der Mischabfälle, der Urantails und (optional) der graphithaltigen Abfälle sind Konrad-Container der Typen IV bzw. VI vorgesehen. Es handelt es sich um quaderförmige Behälter, mit den Maßen 3.000 x 1.700 x 1.450 mm (Typ IV) oder 1.600 x 2.000 x 1.700 mm (Typ VI), die aus Stahlblech (z. B. St 37.2) oder Normalbeton hergestellt werden und ein max. Gewicht von 20 Mg aufweisen. Der Grundaufbau des Stahlblech-Containers besteht aus einer Rahmenkonstruktion mit Stahlprofilen. Die Seitenwände bestehen aus mindestens 3 mm dicken Stahlblechen und sind an ihren Ecken und Kanten miteinander verschweißt. Die Normalbetoncontainer bestehen aus armiertem Beton (Festigkeitsklasse C30/37) mit einer Wandstärke von ca. 20 mm. Die Container-Deckel werden jeweils aus demselben Material hergestellt wie der Behälterkörper und werden mit dem Behälter verschraubt. Zwischen Behälterkörper und Deckel befindet sich erforderlichenfalls eine Elastomer-Dichtung. Zur Handhabung mit Containertraversen müssen an allen acht Ecken der Container ISO-Eckbeschläge angebracht sein.

Für einige Mischabfälle sind Betonbehälter Typ I aus Normal- oder aus Schwerbeton vorgesehen. Es handelt sich hierbei um zylindrische Behälter mit einer Höhe von 1.370 mm und einem Durchmesser von 1.060 mm. Das maximale Gewicht beträgt 4 Mg. Der Betonbehälter besteht aus armiertem Beton (Festigkeitsklasse C30/37). Als Deckel können armierte Betondeckel verwendet werden, die mit dem Behälterkörper zu vergießen oder zu verschrauben sind. Zum Anschlagen an eine Hebevorrichtung müssen bei den Betonbehältern standardisierte Anschlagmöglichkeiten vorhanden sein.

33.4 Standortspezifische Auswirkungen:

Die Auslegungsanforderungen an die Endlagerbehälter für HAW oder für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung leiten sich in erster Linie aus betriebssicherheitlichen Erfordernissen ab. Außerdem müssen die HAW-Endlagerbehälter gemäß Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) auch während der Betriebszeit rückholbar und für die ersten 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers handhabbar sein. Die Einhaltung der Rückholungs- bzw. Bergungsoption wird für die POLLUX- und CASTOR-Behälter durch ihre Auslegung gegen verschiedene mechanische Lastfälle gemäß Verkehrsrecht abgedeckt. Außerdem wird bei den geringen Lösungsmengen im Ostflügel des Endlagers Gorleben eine Flächenkorrosion die Behälter während des Nachweiszeitraums nicht durchdringen können (Müller & Tholen 2009). Die mögliche Wirkung einer Lochfraßkorrosion ist noch zu prüfen.

Abschätzungen haben gezeigt, dass auch bei stärkerem Lösungszutritt die Funktionsdauer der dickwandigen Behälter bei Annahme einer Flächenkorrosion noch mehrere 1.000 Jahre betragen wird, wobei die Schweißnaht zwischen Sekundärdeckel und Behälterkörper allerdings nach 500 Jahren durchkorrodiert sein kann (Müller & Tholen 2009).

Bei den aus Edelstahl gefertigten, dünnwandigen Bohrlochkokillen ist bei geringen Lösungsmengen kein Ausfall durch Flächenkorrosion zu unterstellen (Müller & Tholen 2009), doch neigt Edelstahl zur Lochfraßkorrosion. Entsprechend dem neuen Konzept zur Bohrlochlagerung ist zudem zur Einhaltung der Rückholungs- bzw. Bergungsoption eine Bohrlochverrohrung aus Gussstahl vorgesehen, die einen Lösungszutritt aus dem Gebirge in der frühen Nachverschlussphase verzögert. Auch bei einem stärkeren Lö-

sungszutritt wird die Funktionsdauer der Bohrlochkokillen vor allem durch die Lochfraßkorrosion begrenzt.

Für die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems ist die Gasbildung aufgrund der Metallkorrosion von großer Bedeutung. Diese ist aufgrund der geringen Lösungsmengen in der nordöstlichen Einlagerungsbereichen begrenzt, hat aber im SW-Teil durch die erheblichen Lösungsmengen, die mit den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen eingebracht werden (Dörr et al. 2011, Peiffer et al. 2011), eine größere Bedeutung.

An die Behälter für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bestehen keine Anforderungen bezüglich ihrer Stabilität während der Nachverschlussphase. Eine mechanische Integrität dieser Gebinde kann daher für die Nachverschlussphase nicht unterstellt werden. Somit ist davon auszugehen, dass in den Gebinden vorhandene volatile Radionuklide (z. B. aus der mikrobiellen Degradation organischer Abfallbestandteile) frühzeitig freigesetzt werden. Durch die mit den Abfällen eingebrachten Wassermengen (Dörr et al. 2011, Peiffer et al. 2011) wird die Metallkorrosion und die damit verbundene Gasbildung hier kurz nach der Einlagerung einsetzen.

33.5 Zeitliche Beschränkung

Die Behälter für die verglasten hochradioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) so ausgelegt, dass sie während der Betriebszeit rückholbar und über 500 Jahre handhabbar sind.

Für den restlichen Nachweiszeitraum bestehen keine Anforderungen an die Behälter. Entsprechend der Behälterauslegung und den erwarteten Standortbedingungen ist anzunehmen, dass die Behälter noch über mehrere 1.000 Jahren mechanisch intakt bleiben werden. Noch unklar ist, inwieweit die Lochfraßkorrosion die Funktionsdauer der POLLUX-9- oder CASTOR-Behälter begrenzen wird. Daher wird zurzeit unterstellt, dass die Behälter zu späten Zeiten sukzessive ausfallen werden.

Die Kokillen für die Bohrlochlagerung können durch Korrosion oder mechanische Einwirkungen beeinträchtigt werden. Falls die Bohrlochverrohrung undicht geworden ist und Lösungen zutreten können, wird die Behälterkorrosion intensiviert. Dabei wird die Lochfraßkorrosion für die Funktionsdauer der Behälter der begrenzende Faktor sein.

Deformationen der Bohrlochverrohrung können auch zu Beschädigungen der eingelagerten Behälter führen.

Bei den Behältern für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist zu unterstellen, dass diese durch den Gebirgsdruck und Korrosion nach kurzer Zeit ausfallen können.

33.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

33.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

33.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

33.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das FEP beschreibt eine Randbedingung des Endlagersystems. Die Behältermaterialien und -eigenschaften wurden für das Referenzkonzept festgelegt.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die Endlagerbehälter für Wiederaufarbeitungsabfälle und radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gehören nicht zu den Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: das FEP ist unter "Wirkung in den Teilsystemen" unter "Nahfeld" zu berücksichtigen.

33.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Sonstige Stoffe

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Salzgruskompaktion

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Zersetzung von Organika

Thermische Expansion oder Kontraktion

Radiolyse

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Inventar Metalle, Inventar Sonstige Stoffe: Die Art und Eigenschaften der Metalle und sonstigen Stoffe (Beton) beeinflussen die Behältereigenschaften. Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Ein Behälterausfall verändert die Eigenschaften des Endlagerbehälters.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: falls eine Bohrlochverrohrung durch mechanische Einwirkung deformiert wird, können auch die Behälter im Inneren beeinträchtigt werden. Salzgruskompaktion: Bei Streckenlagerung wirkt die Gebirgsspannung über die Salzgruskompaktion auf die Endlagerbehälter.

Metallkorrosion, Korrosion von Materialien mit Zementhaltigen Stoffen und die Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Diese Prozesse wirken sich unmittelbar auf die Eigenschaften der Behälter aus.

Zersetzung von Organika: Die Zersetzung von Organika kann die Polyethylen-Abschirmungen der POLLUX-Behälter betreffen.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Durch die Wärmeentwicklung des HAW kommt es zur thermischen Expansion und Kontraktion der Behältermaterialien und die Behältereigenschaften werden beeinflusst. Dies ist aber bei der Behälterauslegung berücksichtigt worden.

Radiolyse: Die Radiolyse kann die Feuchtigkeit in zementhaltigen Behältermaterialien betreffen.

Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen: Die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Versatz wirken als mechanische Last auf die Behälter (Streckenlagerung).

Bemerkungen:

Konvergenz: wirkt nicht direkt auf die Behälter, sondern indirekt über die Spannungsänderungen im Versatz (Streckenlagerung) oder nur auf die Bohrlochverrohrung (Bohrlochlagerung).

Mikrobielle Prozesse im Grubenbau: Diese Prozesse sind nicht zu berücksichtigen, da sie nur indirekt durch die Beeinflussung des geochemischen Milieus und die Metallkorrosion auf die Behälter einwirken.

Sorption und Desorption: Die Sorption und Desorption von Stoffen beeinflusst nicht signifikant die Behälteroberflächen.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Salzgruskompaktion Kanalisierung im Salzgrus

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Thermische Expansion oder Kontraktion
Strahlungsinduzierte Aktivierung
Radiolyse
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Sorption und Desorption
Hebung und Absinken von Endlagerbehältern

Begründungen:

Inventar Metalle, Organika, Sonstige Stoffe: Die Behältermaterialien bestimmen wesentlich die Inventare an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen.

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Von den Eigenschaften der Endlagerbehälter hängt es ab, bei welchen Entwicklungen es zu einem Behälterausfall kommen kann.

Salzgruskompaktion: Da die POLLUX- und CASTOR-Behälter gegen mechanische Lasten ausgelegt sind, beeinflussen sie die Salzgruskompaktion.

Kanalisation im Salzgrus: An den Behältern bilden sich Druckschatten aus, die zu einer Kanalisation im Salzgrusversatz führen können.

Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Durch die Behälter-eigenschaften werden auch die Prozesse bestimmt, die den Behälter beeinträchtigen können (Behälterkorrosion bzw. Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme).

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die Wärmeleitfähigkeit der Behältermaterialien beeinflusst die thermische Expansion und Kontraktion im umgebenden Versatz und Gebirge.

Radiolyse, Strahlungsinduzierte Aktivierung: Die Intensität der Radiolyse und der Aktivierung des umgebenden Steinsalzes hängt davon ab, ob die die gelagerten Behälter über Abschirmungen verfügen oder nicht.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Spannungsverhältnisse im umgebenden Versatz und Gebirge hängen von den mechanischen Eigenschaften der Behälter ab.

Sorption und Desorption: An den Behälteroberflächen kann Sorption oder Desorption stattfinden.

Hebung oder Absenkung der Endlagerbehälter: Diese Prozesse werden einerseits durch die Behältermaterialien und ihr spezifisches Gewicht sowie andererseits durch die Form der Endlagerbehälter beeinflusst.

Bemerkungen:

Geochemisches Milieu: Das geochemische Milieu wird nur indirekt über Stofffreisetzungen bei Korrosionsprozessen an den Behältern beeinflusst und daher hier nicht berücksichtigt.

33.11 Offene Fragen

Keine.

33.12 Literaturquellen

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011a): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011b): Umlagerung von 5.000 m³ verpresster Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung von West 2 nach Ost 17. - Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, AP 5, Memo vom 13.07.2011, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Graf, R., Brammer, K.J., Filbert, W. (2012): Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern - ein umsetzbares technisches Konzept. - Jahrestagung Kerntechnik 2012; Stuttgart.

Dörr, S., Filbert, W., Tholen, M. (2011): Beantwortung der Fragen der GRS zu den Betonmengen, den Wasserinhalten und den ggf. vorhandenen Metallanteilen in den Behältern, in den Materialien bei der Konditionierung und in den Abfällen selbst. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller, W., Tholen, M. (2009): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebänden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. - atw, 54. Jg., Heft 5: 303-306.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

34 Versagen eines Brennelement-Behälters (2.1.03.03)

34.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Verlust der Integrität eines Brennelement-Behälters in der Nachverschlussphase, der durch Produktionsfehler, betriebliche Störungen sowie durch mechanische oder chemische Einwirkungen verursacht wurde.

34.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Fertigung von Endlagerbehältern unterliegt einer intensiven Qualitätssicherung. Gleichwohl haben alle Qualitätssicherungsmaßnahmen auch eine geringe Fehlerquote. Von besonderer Relevanz für den Einschluss der radioaktiven Abfälle in den Behältern sind die Dichtheit der Behälterdeckel und der Verschluss der Deckelfuge durch eine Schweißnaht. Die Wahrscheinlichkeit überhaupt einen defekten Behälter endzulagern, setzt sich aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Produktionsfehler auftritt, und der Wahrscheinlichkeit, den Fehler trotz Anwendung zerstörungsfreier Prüfmethode nicht zu erkennen, zusammen. In den entsprechenden Normen zur Prüfung von Materialien mit zerstörungsfreien Prüfmethode werden keine Angaben über die Erkennungsgenauigkeit von Fehlstellen bzw. der kleinsten Größe von erkennbaren Fehlstellen gemacht. Somit können aufgrund fehlender direkt abzulesender Angaben keine Aussagen über die Wahrscheinlichkeit von nicht entdeckten Fabrikationsfehlern gemacht werden. Auch in der Literatur sind nur wenige Hinweise auf Abschätzungen zur Wahrscheinlichkeit der Nichterkennung von Defekten bei Prüfverfahren zu finden (Eberth & Müller-Hoeppe 2009).

Wenn angestrebt wird, die Anforderungen des EUROCODES bei der Fertigung und Prüfung der Behälter einzuhalten, so muss eine Versagenswahrscheinlichkeit von kleiner als 1 E-4 gewährleistet werden (Eberth & Müller-Hoeppe 2009). Dafür müssen die Prüfmethode Fehler auflösen, die das Zuverlässigkeitsniveau gefährden.

SKB hat entsprechende Untersuchungen für das Behälterkonzept des KBS3-Konzeptes und die vorgesehenen Prüfverfahren durchgeführt (SKB 2003, 2006). Dabei hat sich gezeigt, dass das Zuverlässigkeitsniveau des EUROCODE noch nicht erreicht wird, aber dass die vorher von SKB festgelegten Zuverlässigkeitsanforderungen an die

Prüfverfahren von 1 E-3, d. h. höchstens 1 defekter Behälter auf 1.000 produzierte Behälter, erfüllt werden.

Da die Endlagerbehälter über die Straße zum Endlager transportiert werden, sind die CASTOR und POLLUX-Behälter sowie die Transportbehälter für die Kokillen gegen eine Vielzahl von mechanischen und thermischen Lastfällen gemäß den verkehrsrechtlichen Anforderungen ausgelegt. Durch diese Auslegung werden auch die möglichen Störfälle während der Betriebsphase abgedeckt. Zudem wird das Risiko einer Beschädigung der Endlagerbehälter durch betriebliche Störungen (Behälterabsturz) durch technische Maßnahmen (z. B. Auslegung von Handhabungsequipment nach KTA) und durch betriebliche Regelungen minimiert.

Da an die Brennelement-Behälter gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) Anforderungen an die Funktionsdauer der Behälter während der Betriebs- und der Nachverschlussphase des Endlagers bestehen, werden diese Anforderungen durch eine entsprechende Behälterauslegung abgedeckt.

34.3 Sachlage am Standort

Die Integrität der Behälter während der Betriebsphase ist eine genehmigungsrechtliche Anforderung, die durch die Behälterauslegung und Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie durch technische Vorsorgemaßnahmen und betriebliche Regelungen bei Transport und Handhabung der Behälter gewährleistet wird. Zudem bestehen an die Brennelement-Behälter die Anforderungen, dass sie während der Betriebszeit rückholbar eingelagert werden müssen und dass sie in den ersten 500 Jahren der Nachverschlussphase, unter Zugrundelegung der wahrscheinlichen Standortentwicklung, eine Freisetzung volatiler Aerosole verhindern und zudem für eine Bergung handhabbar sein müssen (BMU 2010). Dies wird durch eine entsprechende Auslegung der Endlagerbehälter bzw. durch ein entsprechendes Endlagerkonzept (Verrohrung von Einlagerungsbohrlöchern) gewährleistet.

Das Risiko, dass ein Behälter Produktionsfehler aufweist, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können, wird durch umfangreiche Prüfmaßnahmen bei der Behälterfertigung minimiert. Angesichts der großen Anzahl einzulagernder Gebinde mit ausgedienten Brennelementen (Konzept B 1: 2.120 POLLUX- und 511 CASTOR-Behälter für Forschungsreaktor-BE, Konzept B 2: 1.097 CASTOR-Behälter für Leistungsreaktor-BE

und 511 CASTOR-Behälter für Forschungsreaktor-BE, Konzept C: 7.068 BSK für Leistungsreaktor-BE und 292 BSK für Forschungsreaktor-BE, Bollingerfehr et al. 2011, Peiffer et al. 2011) ist aber gleichwohl nicht auszuschließen, dass eine geringe Anzahl von Brennelement-Behältern während der Nachverschlussphase aufgrund von Fertigungsdefiziten frühzeitig ausfällt. Entsprechend dem aktuellen Stand der Technik bei anderen großtechnischen Fertigungsprozessen und in Anlehnung an Untersuchungen in Endlagerprojekten anderer Länder (Ebert & Müller-Hoeppe 2009, SKB 2003, 2006) wird hier angenommen, dass maximal 0,1 % der eingelagerten Behälter von Beginn an unerkannte Fertigungsfehler aufweisen, die zu einem vorzeitigen Versagen, d. h. während der vorgesehenen Funktionsdauer, der Brennelement-Behälter führen können. Die Fehlerquote bei der Behälterherstellung ist vom spezifischen Fertigungsprozess und den Prüfverfahren abhängig und für die verschiedenen Brennelement-Behälter bei ihrer Zulassung nachzuweisen.

Die POLLUX- und CASTOR-Behälter sind entsprechend ihrer verkehrsrechtlichen Zulassung gegen verschiedene Absturzscenarien ausgelegt. Es ist nachzuweisen, dass diese Auslegung auch mögliche Absturzscenarien im Endlagerbetrieb abdeckt. Bei der BSK besteht das Risiko einer Behälterbeschädigung durch Behälterabsturz nur bei der Einlagerung von Kokillen in die verrohrten Bohrlöcher. Dieses Risiko wird durch eine Auslegung der Handhabungsgeräte nach kerntechnischen Anforderungen (KTA) und durch organisatorische Maßnahmen so weit minimiert, dass es nicht mehr zu betrachten ist.

Außerdem werden die POLLUX- und CASTOR-Behälter im Zuge der wahrscheinlichen Standortentwicklung aufgrund der geringen Restfeuchte im Versatz und im Gebirge während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht durch Flächenkorrosion zerstört (Müller & Ewig 2008, Müller & Tholen 2009). Eine mögliche Lochfraßkorrosion ist noch zu bewerten. Die Behälterauslegung berücksichtigt außerdem eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme.

Die Korrosionsbeständigkeit der BSK ist ähnlich (Müller & Tholen 2009). Die mechanische Integrität der BSK wird während der erforderlichen Funktionsdauer von 500 Jahren durch eine Bohrlochverrohrung sichergestellt.

Nach Ablauf der vorgesehenen Funktionsdauer ist ein Behälterausfall durch chemische und/oder mechanische Einwirkungen nicht auszuschließen (Müller & Ewig 2008, Müller & Tholen 2009).

34.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Während der vorgesehenen Funktionsdauer von 500 Jahren ist ein Behälterversagen durch Flächenkorrosion oder durch thermomechanische Einwirkungen für die wahrscheinliche Standortentwicklung aufgrund der Behälterauslegung nicht zu unterstellen. Auch die Wahrscheinlichkeit eines Behälterversagens durch eine betriebliche Störung wird durch technische und organisatorische Vorsorgemaßnahmen soweit reduziert, dass sie in den Restrisikobereich fällt.

Zu späten Zeiten ist ein Versagen eines Brennelement-Behälters durch Korrosion (z. B. Lochfraßkorrosion) oder Gebirgsdruck nicht auszuschließen (Müller & Ewig 2008, Müller & Tholen 2009).

Bei Berücksichtigung der oben genannten Behälterzahlen für das Endlagerkonzept B1 und einer Wahrscheinlichkeit unerkannte Fertigungsfehler von $1 \text{ E-}3$ kann mit Hilfe der Binomialverteilung die Einlagerung von bis zu 4 POLLUX- und 1 CASTOR-Behälter mit Fertigungsfehlern als wahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit $> 10 \%$) und von 6 POLLUX- und 3 CASTOR-Behältern mit Fertigungsfehlern als weniger wahrscheinlich (Eintrittswahrscheinlichkeit $< 10 \%$ und $> 1 \%$) unterstellt werden.

Analog ergeben sich für das Endlagerkonzept B2 bei der wahrscheinlichen Entwicklung bis zu 2 CASTOR für Leistungsreaktor-BE und 1 CASTOR-Behälter für Forschungsreaktor-BE mit Fertigungsfehlern sowie bei der weniger wahrscheinlichen Entwicklung bis zu 4 CASTOR für Leistungsreaktor-BE und 3 CASTOR-Behälter für Forschungsreaktor-BE mit Fertigungsfehlern.

Entsprechend der größeren Anzahl eingelagerter Behälter ist die Anzahl von Behältern, die möglicherweise Fertigungsfehler aufweisen, für das Bohrlochlagerungskonzept C deutlich höher (wahrscheinliche Entwicklung: 11 BSK für Leistungsreaktor-BE und 1 BSK für Forschungsreaktor-BE, weniger wahrscheinliche Entwicklung: 14 BSK für Leistungsreaktor-BE und 2 BSK für Forschungsreaktor-BE).

Beim Versagen eines Brennelement-Behälters werden volatile Radionuklide, die sich im Behälterinnenraum befinden, freigesetzt. Ob es außerdem zu einer Matrixkorrosion mit Radionuklidfreisetzung bei den Brennelementen kommen kann, hängt von der Menge der verfügbaren Lösungen ab.

34.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

34.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

34.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

34.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Brennelement-Behälter

34.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Bei mehreren 1.000 eingelagerten Brennelement-Behältern ist aufgrund der Fehlerquote von 0,1 % in großtechnischen Fertigungsprozessen nicht zu auszuschließen, dass eine geringe Anzahl von Behältern aufgrund von Produktionsfehlern vorzeitig ausfallen wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für das "Versagen eines Brennelement-Behälters" ist daher "wahrscheinlich".

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Der Brennelement-Behälter ist eine Initial-Barriere.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist unter Wirkung in den Teilsystemen unter "Nahfeld" zu berücksichtigen.

34.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Brennelement-Behälter

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Brennelement-Behälter: Die Eigenschaften der Behälter bestimmen, ob und unter welchen Randbedingungen es zum Ausfall der Behälter kommen kann.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Falls es durch Gebirgsspannungen zum mechanischen Ausfall einer Bohrlochverrohrung kommt, kann der Gebirgsdruck unmittelbar auf den Brennelement-Behälter einwirken und zu dessen Versagen führen.

Metallkorrosion: Falls ausreichend Lösungen zur Verfügung stehen, kann die Metallkorrosion zu einem Behälterausfall führen.

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Infolge einer Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme kann die mechanische Stabilität des Behälters beeinträchtigt werden.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Der Gebirgsdruck wirkt durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Salzgrusversatz auf die eingelagerten Endlagerbehälter (Streckenlagerung). Wenn die mechanische Last die mechanische Stabilität des Behälters überschreitet, kann es zum Behälterversagen kommen.

Resultierende FEP:

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Radionuklidmobilisierung: Falls es zum Versagen eines Brennelement-Behälters kommt, so werden die volatilen Radionukliden aus dem Behälterinnenraum freigesetzt.

Beeinflusste FEP:

Brennelement-Behälter

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Begründungen:

Brennelement-Behälter: Ein Ausfall des Behälters führt zu einer Beeinflussung der Behältereigenschaften.

Korrosion der Brennstoffmatrix: Nach einem Behälterausfall können zutretende Lösungen zu einer Korrosion der Brennstoffmatrix führen.

Metallkorrosion: Nach einem Behälterausfall kann es zu einer Korrosion der Strukturteile der Brennelemente bzw. der Brennelementkugeln im Behälter kommen.

34.11 Offene Fragen

Fehlerwahrscheinlichkeit in den behälterspezifischen Fertigungsprozessen

34.12 Literaturquellen

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Eberth, S., Müller-Hoeppe, N. (2009): Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine, ÜBERSICHT. - Abschlussbericht DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-30-2008-AB; Peine.

Müller, W., Ewig, F. (2008): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, ISTEC-A-1301; Garching.

Müller, W., Tholen, M. (2009): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. - atw, 54. Jg., Heft 5: 303-306.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

SKB (2003): Planning report for the safety assessment. - SR-Can., TR-03-08, Tech, report; Stockholm.

SKB (2006): [http: www.skb.se/default2_16855.aspx](http://www.skb.se/default2_16855.aspx) , 19.12.2006

35 Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters (2.1.03.04)

35.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Verlust der mechanischen Stabilität und der Integrität eines Behälters für Wiederaufarbeitungsabfälle oder sonstige Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung durch Produktionsfehler, betriebliche Störungen oder durch mechanische bzw. chemische Einwirkungen.

35.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Alle sonstigen Endlagerbehälter erfüllen die verkehrsrechtlichen und die betriebs-sicherheitlichen Anforderungen bzw. werden durch die Verwendung von Transport-abschirmungen entsprechend gehandhabt. Dadurch deckt die Behälterauslegung eine Vielzahl von mechanischen und thermischen Lastfällen ab, die mögliche Störfälle im Endlagerbetrieb einschließt. Entsprechende Nachweise sind zu führen. Zudem wird das Risiko einer Beschädigung der Endlagerbehälter aufgrund von betrieblichen Störungen durch technische Maßnahmen (z. B. redundante Auslegung von Handha-bungsequipment nach KTA) und durch betriebliche Regelungen minimiert.

Da die Endlagerbehälter für verglaste wärmeentwickelnde Wiederaufarbeitungsabfälle keine volatilen Radionuklide enthalten, bestehen an sie gemäß den Sicherheitsanfor-derungen (BMU 2010) keine Dichtheitsanforderungen, aber die Behälter müssen wäh-rend der Betriebszeit rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Ver-schluss des Endlagers zu bergen sein. Somit beschränken sich die Anforderungen an die Behälter während der Nachverschlussphase auf eine Handhabbarkeit über 500 Jahre.

Soweit die Endlagerbehälter mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen volati-le Radionuklide enthalten können, bestehen entsprechend der Strahlenschutzverord-nung Dichtheitsanforderungen an diese Behälter für die Betriebsphase bis zur Einlage-rung. Da für die Nachverschlussphase keine Rückholung oder Bergung gefordert ist und für diese Behälter weder Dichtheits- noch Stabilitätsanforderungen bestehen, sind weder die Behälterdichtungen langzeitstabil noch sind die Behälter gemäß dem Ge-birgsdruck ausgelegt.

35.3 Sachlage am Standort

Die Integrität der Behälter während der Betriebsphase bis zur Einlagerung ist eine genehmigungsrechtliche Anforderung, die durch die Behälterauslegung und Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie durch technische Vorsorgemaßnahmen und betriebliche Regelungen bei Transport und Handhabung der Behälter gewährleistet wird. Zudem besteht an die Endlagerbehälter mit wärmeentwickelnden Wiederaufarbeitungsabfällen die Anforderung, dass sie während der Betriebszeit rückholbar eingelagert werden müssen und dass sie in den ersten 500 Jahren der Nachverschlussphase, unter Zugrundelegung der wahrscheinlichen Standortentwicklung, handhabbar für eine Bergung sein müssen (BMU 2010). Dies wird durch eine entsprechende Auslegung der Endlagerbehälter bzw. durch ein entsprechendes Endlagerkonzept (Kokillen in Triplepacks in verrohrten Bohrlöchern) gewährleistet (Bollingerfehr et al. 2011, Bollingerfehr et al. 2012).

Die POLLUX-, CASTOR- u. a. Transport- und Lagerbehälter sowie die MOSAIK-Behälter, die Konrad-Container und die Transportabschirmungen für die Triplepacks sind entsprechend ihrer verkehrsrechtlichen Zulassung gegen verschiedene Brand- und Absturzszenarien ausgelegt und diese Auslegung deckt auch mögliche Störfälle während des Endlagerbetriebs ab. Entsprechende Nachweise sind zu führen. Beim Triplepack besteht das Risiko einer Behälterbeschädigung durch Behälterabsturz nur bei der Einlagerung von Kokillen in die Bohrlöcher. Dieses Risiko wird durch eine redundante Auslegung der Handhabungsgeräte nach kerntechnischen Anforderungen (KTA) und durch organisatorische Maßnahmen soweit minimiert, dass es in den Restrisikobereich fällt.

Für die Nachverschlussphase bestehen an alle sonstigen Endlagerbehälter weder Anforderungen an die Dichtheit noch an die Integrität. Die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) fordern für die Behälter mit wärmeentwickelnden, verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen eine Handhabbarkeit über 500 Jahre, wobei eine Beeinträchtigung der Dichtheit aufgrund des Fehlens volatiler Radionuklide aber zulässig ist.

Die mechanische Auslegung der POLLUX-, CASTOR- u. a. Transport- und Lagerbehälter entspricht weitgehend den entsprechenden Brennelement-Behältern und es ist nachzuweisen, dass sie die mechanische Belastung durch den Gebirgsdruck abdeckt. Bei der wahrscheinlichen Standortentwicklung ist eine Zerstörung der dickwandigen Behälter durch Flächenkorrosion aufgrund der geringen Lösungsmengen nicht zu er-

warten (Müller & Ewig 2008, Müller & Tholen 2009). Eine mögliche Beeinträchtigung der Behälterintegrität durch Lochfraßkorrosion muss noch untersucht und bewertet werden. Da an die Behälter keine Dichtheitsanforderungen bestehen, sind die Deckeldichtsysteme möglicherweise nicht langzeitstabil. Ein Zutritt von Feuchtigkeit zur Abfallmatrix ist daher auch vor der Zerstörung des Behälterkörpers denkbar.

An die Gebinde für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung besteht nur die Anforderung der Integrität während der Betriebsphase bis zur Einlagerung. Da die Behälter nicht gegen den Gebirgsdruck ausgelegt sind, ist davon auszugehen, dass sie nach der Einlagerung und dem Auflaufen des Gebirges durch den Gebirgsdruck rasch zerstört werden können. Außerdem werden mit den Abfällen größere Lösungsmengen in die Einlagerungsbereiche eingebracht, die zu einer frühzeitigen Korrosion der Behälter führen können.

35.4 Standortspezifische Auswirkungen

Es bestehen keine Anforderungen an die Integrität der Behälter in der Nachverschlussphase. Ein Ausfall von Behältern mit verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen führt zu keiner Freisetzung volatiler Radionuklide. Im Einlagerungsbereich vorhandene Lösungen können dann aber zur Abfallmatrix vordringen und nach deren Korrosion Radionuklide mobilisieren.

Der frühzeitig erwartete Ausfall von Endlagerbehältern mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen durch mechanische Einwirkung (Gebirgsdruck) und/oder Korrosion wird zu einer Freisetzung der volatilen Radionuklide aus dem Behälterinnenraum führen. Die Korrosion wird dabei durch die Lösungsmengen, die mit den Abfällen eingebracht werden, gefördert. Nach der Zerstörung der Behälter kann es auch zu einer Radionuklidmobilisierung durch Korrosion der Abfallmatrix kommen. Die Korrosionsprodukte von Metall und Zement verfügen allerdings über gute Sorptionseigenschaften für Radionuklide.

35.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. An die Funktionsdauer der Endlagerbehälter für Wiederaufarbeitungsabfälle oder vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bestehen keine Anforderungen im Hinblick auf die Langzeitsicherheit. Die Anforderung bezüglich der Hand-

habbarkeit von Endlagerbehältern mit hochradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfällen während der ersten 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers wird durch die Auslegung der POLLUX- und CASTOR-Behälter abgedeckt. Bei den Bohrlochkokillen wird die Handhabbarkeit über 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers durch ein entsprechendes Endlagerkonzept (Bohrlochverrohrung) sichergestellt.

Bei den Behältern für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist zu unterstellen, dass diese durch den Gebirgsdruck nach kurzer Zeit zerstört werden.

35.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit:

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

35.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

35.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

35.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: An die Integrität der Behälter für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung bestehen keine Anforderungen für die Nachverschlussphase. Es ist nicht auszuschließen, dass diese Behälter nach kurzer Zeit durch den Gebirgsdruck zerstört werden. Auch bei den Behältern mit verglasten Wiederaufarbeitungsabfällen ist eine Beeinträchtigung der Integrität zulässig, solange

die "Handhabbarkeit" über 500 Jahre gewährleistet bleibt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Behälterausfall ist daher "wahrscheinlich".

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist im Teilsystem "Nahfeld" zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die betroffenen Behälter sind keine Initial-Barrieren.

35.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Sonstige Endlagerbehälter

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Sonstige Endlagerbehälter: Die Eigenschaften der Behälter bestimmen, ob und unter welchen Randbedingungen es zum Ausfall der Behälter kommen kann.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Falls eine Bohrlochverrohrung durch mechanische Einwirkung stark deformiert wird, so können auch die Behälter im Inneren beschädigt werden.

Metallkorrosion, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Falls ausreichend Lösungen zur Verfügung stehen, kann die Metallkorrosion bzw. die Korrosion zementhaltiger Materialien zu einem Behälterausfall führen.

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme kann zur Beeinträchtigung der Stabilität des Behälters führen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Der Gebirgsdruck wirkt durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Versatz auf die eingelagerten Endlagerbehälter. Wenn die mechanische Last die mechanische Stabilität der Behälter überschreitet, kann es zum Behälterausfall kommen.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Sonstige Endlagerbehälter Metallkorrosion

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Sonstige Endlagerbehälter: Durch einen Behälterausfall werden die Eigenschaften des Behälters beeinflusst.

Metallkorrosion, Korrosion von Glas, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails: Nach einem Behälterausfall können zutretende Lösungen zu einer Korrosion der Behälterinnenseite, der Abfälle und der Abfallmatrix aus Glas, Zement, Graphit oder U_3O_8 führen.

Radionuklidmobilisierung: Nach dem Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters können im Innenraum eingeschlossene volatile Radionuklide instantan freigesetzt werden.

35.11 Offene Fragen

Keine.

35.12 Literaturquellen

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller, W., Ewig, F. (2008): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, ISTEC-A-1301; Garching.

Müller, W., Tholen, M. (2009): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. - atw, 54. Jg., Heft 5: 303-306.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

36 Versatz (2.1.04.01)

36.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Versatz werden alle bergmännisch eingebrachten Stoffe verstanden, die zur Ausfüllung untertägiger Hohlräume zum Einsatz kommen. Die Eigenschaften des in die Grubenbaue eingebrachten Versatzes bestimmen dessen Verhalten gegenüber chemischen, thermischen, hydraulischen, mechanischen und anderen physikalischen Einwirkungen.

36.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Materialien, die als Komponenten eines Verschlussbauwerkes fungieren, werden in den entsprechenden FEP (Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse oder Streckenverschlüsse) beschrieben. So ist z. B. in den Schachtverschlüssen Schotter als Widerlager vorgesehen. Eigenschaften dieses Elementes werden im FEP Schachtverschlüsse beschrieben.

Abhängig vom Einlagerungskonzept bezweckt das Verfüllen der aufgefahrenen Hohlräume eines oder mehrere der folgenden Ziele:

- die Stützung der Grubenwände zur Verhinderung des Hereinbrechens von Gestein,
- die Minimierung von Hohlräumen, ggf. aber auch die Bildung eines Speichervolumens für Fluide
- die Ableitung entstehender Wärme aus den Abfallgebänden ins Gebirge,
- die Einbettung der Abfallgebände, zu deren Schutz vor mechanischer Beschädigung durch herabfallendes Gestein oder Scherbewegungen des Grubenraums,
- die Pufferung des chemischen Milieus,
- die mittel- bis langfristige Verhinderung oder Verzögerung eines Lösungszutritts aus dem Gebirge/Grubengebäude zu den Abfallgebänden und

- die Verhinderung oder Verzögerung des Radionuklidtransportes aus dem Grubengebäude im Falle eines Lösungszutrittes in die Einlagerungsbereiche und einer anschließenden Radionuklidfreisetzung.

Als Versatz können unter anderem Anwendung finden: Salzhauwerk (Salzgrus), Schotter (z. B. aus Basalt) oder Kies, Bentonit, Bentonit-Mineral-Gemische oder zementhaltige Materialien (z. B. Benett et al. 1998, Laumert 2008).

Versatz kann so eingebracht werden, dass die zu versetzenden Grubenbaue nahezu vollständig ausgefüllt werden. Hohlräume können im Firstbereich bestehen bleiben. Zur Einbringung des Versatzes stehen besondere Techniken zur Verfügung, z. B. das Einblasen oder Spülen (Spülversatz).

Wichtige Eigenschaften des Versatzmaterials sind die Dichte, die Porosität, die Permeabilität, das Kompaktionsverhalten, die Wärmeleitfähigkeit und seine Korngröße. Die Eigenschaften hängen vor allem von seiner Zusammensetzung und der Art des Einbringens ab. Unterschiedliche Eigenschaften können sich zusätzlich in Abhängigkeit vom Anteil der Bindemittel und Zuschlagstoffe, des Durchmischungsgrades von Bindemitteln und Zuschlagstoffen, vom Quellvermögen bzw. Schrumpfverhalten beim Abbinden, Aushärten oder beim Kontakt mit Lösungen ergeben.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften des Versatzes hat seine Verdichtung bzw. die Anzahl, Form, Größe und Ausfüllung der verbleibenden Poren zwischen den Versatzkörnern. Die Versatzverdichtung kann während des Einbringens durch die Wahl des Versatzverfahrens und eines gegebenenfalls einzusetzenden Nachverdichtens eingestellt werden. Durch Sackungen im Versatz können auch bevorzugte Fließwege ausgebildet werden (siehe FEP Kanalisierung im Salzgrus). Die Bedingungen im Nahfeld sowie im Wirtsgestein können sich durch Spannungsänderungen, Spannungsumlagerungen, Konvergenz und/oder Scherverformungen und Zustrom von Fluiden (charakterisiert durch Chemismus und thermodynamische Fluideigenschaften) auf den Zustand des Versatzmaterials auswirken. Die Wirkungen auf die Eigenschaften des Versatzmaterials können dabei sein:

- veränderte Stützfähigkeit,
- Änderung des Versatzvolumens durch Kompaktionen (Änderung des Porenvolumens),

- (Auf-)Lösung und/oder Ablagerungen von in wässrigen Lösungen gelöstem Versatzmaterial,
- Aufnahme oder Abgabe von Fluiden durch das Versatzmaterial
- Änderung der Korngrößenverteilung und
- veränderte Durchlässigkeit für Fluide und Radionuklide bzw. Reaktionen auf Fluidzustrom aus der Auflockerungszone.

36.3 Sachlage am Standort

Im Endlagerkonzept (Bollingerfehr et al. 2011) wird Salzgrus als Versatz für die Einlagerungsfelder, die Querschläge und Richtstrecken vorgesehen. Im Nahfeld wird bis zu den Dichtpfropfen in den Querschlägen ausschließlich trockener Salzgrus eingesetzt. In den Richt- und Bergbautransportstrecken wird feuchter Salzgrus eingebracht. Der Feuchtegehalt des trockenen Versatzes entspricht jener des aufgefahrenen Salzgesteins, jener für feuchten Versatz ist noch zu spezifizieren. Trockener und feuchter Versatz sind durch Dichtpfropfen in den Querschlägen voneinander getrennt. Die Anfangsporosität des eingebrachten Salzgruses beträgt etwa 30 bis 40 %.

Salzgrus ist in seinen chemischen Eigenschaften dem Wirtsgestein ähnlich, weist aber eine höhere Porosität auf. Salzgrus kompaktiert unter dem Gebirgsdruck, wobei die Kompaktion durch Feuchtigkeit beeinflusst wird. Salzgrus wird dabei nicht nur mechanisch, sondern auch chemisch, thermisch und durch ionisierende Strahlung beeinflusst. Solange allerdings keine ungesättigten Lösungen zutreten, ist Salzgrus langfristig stabil und erreicht durch Kompaktion eine vergleichbare Dichtwirkung wie Steinsalz. Bei der Beschreibung der Salzgruskompaktion unter Endlagerbedingungen besteht noch Forschungsbedarf (siehe FEP Salzgruskompaktion).

Für die Verfüllung der Infrastrukturbereiche der Einlagerungs- und Erkundungssohle (vom Schachtfüllort bis zu den Streckenverschlüssen) sind Serpentin- oder Basalt-schotter mit Bischoffit als Zuschlagstoff vorgesehen. Basalt und Serpentin zeichnen sich durch ihre hohe Festigkeit und Langzeitstabilität aus. Diese Materialien werden durch die im Endlager zu erwartenden Lasten nicht kompaktiert, d. h. das vorhandene Hohlraumvolumen in den Schottern wird nicht nennenswert reduziert. Auch das Eindringen von Salzgestein in das Hohlraumvolumen kann vernachlässigt werden (Jobmann et al. 1999).

Durch das Einbringen von nicht kompaktierbarem Versatz ergibt sich ein potenzielles Speichervolumen für Fluide.

Gemäß Bohrlochkonzept wird in den Ringspalt zwischen Verrohrung und dünnwandigen Endlagerbehältern Quarzsand als Versatz mit einer Feuchte von ca. 0,2 Gew.- % eingebracht.

Die Sorptionseigenschaften der Versatzmaterialien sind im FEP Sorption und Desorption beschrieben.

36.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Zusammensetzung des Versatzes bestimmt im wesentlichen Maße seine thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften. Die Porenräume im Salzgrus werden durch Kompaktion aufgrund des vorherrschenden Spannungszustandes verkleinert (siehe FEP Salzgruskompaktion).

Unter feuchten Bedingungen oder erhöhten Temperaturen sind die mechanischen Eigenschaften des Salzgruses verändert, da die Fließfähigkeit des Salzes zunimmt und die damit verbundenen Prozesse schneller ablaufen.

Der Versatz beeinflusst die Spannungsverhältnisse im Grubengebäude und im umgebenden Wirtsgestein. Im Falle eines Zutrittes von nicht an Steinsalz gesättigten Lösungen kann es zu einer Auf- oder Umlösung des Salzgruses kommen (siehe FEP Auflösung und Ausfällung). Chemische Wechselwirkungen zwischen Versatz und wässrigen Lösungen können das chemische Milieu (pH- und Eh-Wert, chemische Zusammensetzung) sowie die Eigenschaften des Versatzmaterials (Sorptionseigenschaften, Quellfähigkeit, mechanische Stabilität) beeinflussen.

Die Schotter aus Basalt bzw. Serpentin werden nicht kompaktiert und deren Hohlraum bildet ein Speichervolumen für Gase und Lösungen.

36.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

36.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

36.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

36.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

36.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung in den Teilsystemen: Der Versatz ist eine Randbedingung und wird im Nahfeld und in die übrigen Strecken und Schächten eingebracht und ist daher in diesen Teilsystemen zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Der Versatz beeinträchtigt keine Initial-Barrieren. Die Einwirkungen des Versatzes auf die Initial-Barrieren sind positiv (z. B. Stützwirkung). Der Versatz selbst keine Initial-Barrieren dar.

36.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Konvergenz

Salzgruskompaktion

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lösungen im Grubenbau

Kanalisation im Salzgrus

Auflösung und Ausfällung

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Wärmeproduktion

Thermische Expansion oder Kontraktion

Verdampfen von Wasser

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Konvergenz: Die Konvergenz beeinflusst die Setzung des Versatzes (z. B. Schotter).

Salzgruskompaktion: Die Kompaktion des Versatzes ändert seine Eigenschaften (Festigkeit, Porosität).

Lösungen im Grubenbau: Die in einer versetzten Strecke vorhandene Menge an Lösungen verändert die Versatzeigenschaften, z. B. seine Feuchte.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung: Eine Setzung der Schotter oder des Sandes ändert deren Eigenschaften.

Auflösung und Ausfällung: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse können Zusammensetzung und Eigenschaften des Versatzes ändern.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die Wärme aus den Abfällen führt zu einer thermischen Expansion oder Kontraktion der Versatzmaterialien.

Kanalisation im Salzgrus: Die Ausbildung von bevorzugten Fließwegen ändert Eigenschaften des Salzgruses (Permeabilität etc.).

Verdampfen von Wasser: reduziert die Feuchtigkeit im Versatz, hat z. B. Einfluss auf die Kriechfähigkeit des Salzgruses.

Wärmeproduktion: Die Temperatur hat z. B. Einfluss auf die Kriechfähigkeit des Salzgruses.

Radiolyse: Die Feuchte im Quarzsand kann von Radiolyse betroffen sein.

Strahlungsinduzierte Aktivierung: Ändert die Zusammensetzung des Versatzes

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock, Thermochemische Sulfat-reduktion: Das Sulfat im Salzgrus kann durch diese Prozesse umgewandelt werden.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Salzgruskompaktion

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lösungen im Grubenbau

Kanalisation im Salzgrus

Auflösung und Ausfällung

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Thermische Expansion oder Kontraktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Thermochemische Sulfatreduktion

Sorption und Desorption

Begründungen:

Lösungen im Grubenbau: Die Menge der Lösungen in einem Grubenbau kann durch eingebrachte Versatzfeuchte erhöht werden.

Bohrlochverrohrung: Der Innenraum der Verrohrung wird mit Quarzsand verfüllt.

Salzgruskompaktion: Das Kompaktionsverhalten ist von den Eigenschaften des Salzgruses (Feuchte) abhängig.

Kanalisation im Salzgrus: Die Möglichkeit einer Kanalisation ist von den Eigenschaften des Salzgruses abhängig.

Auflösung und Ausfällung: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse sind vom verwendeten Versatzmaterial abhängig.

Strahlungsinduzierte Aktivierung, Radiolyse: Diese Prozesse werden durch das verwendete Versatzmaterial beeinflusst.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Je nach eingesetztem Material läuft eine Expansion bzw. Kontraktion unterschiedlich ab.

Konvergenz: Das Versatzmaterial bestimmt den Aufbau des Stützdrucks der der Konvergenz entgegenwirkt.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Versatzeigenschaften beeinflussen den Ablauf der Spannungsumlagerung, z. B. in der Salinarkontur.

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock, Thermochemische Sulfat-reduktion: Das Sulfat im Versatz kann Ausgangsstoffe für diese Prozesse liefern.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung: Eine Setzung der Schotter oder des Sandes ist abhängig von den Versatzeigenschaften.

Sorption: Wird berücksichtigt, obwohl Schotter, Sand und Salzgrus geringe Sorptionsfähigkeit zugeschrieben werden. Ist aber noch zu prüfen.

36.11 Offene Fragen

- Offene Fragen bestehen vor allem hinsichtlich des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus (siehe FEP Salzgruskompaktion)
- Optimierungsmöglichkeiten durch den Einsatz möglicher alternativer Versatzstoffe, z. B. selbstverheilender Versatz

- Feuchtegehalte von trockenem und feuchtem Versatz
- Wärmeleitfähigkeit von Salzgrus mit hohen Porositäten

36.12 Literaturquellen

Benett, D.G., Papenguth, H.W., Chu, M.S.Y., Galson, D.A., Duerden, S.L., Matthews, M.L. (1998): International Workshop on the Uses of Backfill in Nuclear Waste Repositories. Carlsbad, New Mexico, US, May 1998, R&D Technical Report P178, Environment Agency and US DOE, Carlsbad; Bristol.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Jobmann, M., Kreienmeyer, M., Lerch, C. (1999): Untersuchungen zur verbleibenden Versatzdurchlässigkeit. Bericht DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Laumert, G. (2008): Pumpversatz mit Salzbeton zur Sicherung eines Grubenteils des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Glückauf 144, Nr. 1/2: 26-33.

Weiterführende Literatur:

Brasser, T., Droste, J., Müller-Lyda, I., Neles, J.M., Sailer, M., Schmidt, G., Steinhoff, M. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-247; Braunschweig.

Müller-Lyda, I. (1999): Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz - Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-143; Braunschweig.

Stührenberg, D., Zhang, C. (1998): Projekt Gorleben - Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus. - Endbericht zu AP 9G 21382100, BGR; Hannover.

37 Verschlussmaterial (2.1.05.01)

37.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Zusammensetzung und Eigenschaften der Verschlussmaterialien, die für die Errichtung der Schacht- und Streckenverschlüsse sowie die Dichtpfropfen vorgesehen sind.

37.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Durch die Auffahrung eines Endlagerbergwerkes wird die Integrität des Wirtsgesteins beeinträchtigt. Die Verbindungen der Abfälle durch das Endlagerbergwerk mit der Biosphäre müssen daher zum Ende der Betriebsphase durch Verschlussbauwerke verschlossen werden. Im Salzgestein müssen die Verschlussbauwerke einen Lösungszutritt zu den Einlagerungsbereichen solange verhindern, bis der Salzgrusversatz in den Strecken soweit kompaktiert ist, dass er die Dichtfunktion übernimmt.

Grundsätzlich werden von den Verschlussmaterialien im Salzgestein entsprechend ihrer Funktion als Widerlager oder Dichtelement folgende Eigenschaften gefordert:

- Kompatibilität mit dem umgebenden Wirtsgestein
- Beständigkeit gegen saline Wässer aus Einschlüssen im Wirtsgestein oder durch zufließende Lösungen,
- mechanische Stabilität,
- ausreichend geringe hydraulische Durchlässigkeit der Baustoffe für die Dichtelemente, und
- Langzeitbeständigkeit der Materialien, damit die definierten Materialeigenschaften über die geplante Funktionsdauer der Barrieren erhalten bleiben.

Die folgenden Materialien erfüllen die genannten Anforderungen und wurden entsprechend ihrer Funktion in den Verschlussbauwerken in Salzbergwerken eingesetzt bzw. sind dafür vorgesehen:

- Schotter aus Basalt bzw. Diabas als setzungsarme Stützsäulen für Schachtfundamente (Kali & Salz 2002).

- Bentonit als Material für Dichtungselemente. Dabei können je nach geochemischem Milieu verschiedene Bentonitsorten (z. B. MX80, Montigel, Calcigel) eingesetzt werden, deren Zusammensetzung und Eigenschaften entsprechenden Datenblättern entnommen werden kann. Bentonit wird als hochverdichtete Briketts oder als Granulat eingebaut. Ein Bentonitdichtelement sollte eine möglichst hohe Einbaudichte aufweisen (Kali & Salz 2002). Außerdem hängt die Funktionsfähigkeit eines Bentonit-Dichtelementes von einem konturbündigen Einbau und einer gleichmäßigen Aufsättigung des Bentonits mit Wasser ab.
- Bitumina und Asphalt werden beim Schachtausbau als Gleitschichten, viskose Dichtungsmittel sowie zur Abdichtung der Dichtungsschlitze von Dichtelementen eingesetzt (Sitz 1981). Ihre Verwendung ist z. B. für die Schachtverschlüsse des ERAM vorgesehen.
- Salzbeton, Solebeton, Sorelbeton und Magnesiabinder für Verschlussbauwerke und Widerlager von Schachtverschlüssen und
- Naturwerksteine für Mauerwerk von Widerlagern.

Während im Rahmen des FuE-Projektes „Schachtverschluss Salzdetfurth“ (Kali & Salz 2002) ein Konzept für einen Schachtverschluss entwickelt und erprobt wurde, wurden im Bergwerk Asse die Errichtung von Streckenverschlüssen aus Sorelbeton erfolgreich erprobt (Gläss et al. 2005, Meyer et al. 2008).

Zur rechnerischen Analyse der Strecken- und Schachtverschlüsse im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises ist die Kenntnis von geeigneten Stoffmodellen und von natürlichen Analoga notwendig, damit einerseits ein Nachweis der Tragfähigkeit und Dichtheit geführt werden kann und andererseits davon entkoppelt die Beständigkeit des jeweiligen Verschlussmaterials nachgewiesen werden kann (BMBF 2006). Die Eigenschaften der Verschlussmaterialien und Ansätze für deren Abbildung in Modellen wurden in verschiedenen FuE-Projekten untersucht:

- der Nachweis der Setzungsstabilität von Schottersäulen für Schachtverschlüsse ist im Rahmen des Forschungsvorhabens "Schachtverschluss Salzdetfurth" (Kali & Salz 2002) erfolgt.
- Beim FuE-Projekt "Schachtverschluss Salzdetfurth" (Kali & Salz 2002) sowie bei einem FuE-Vorhaben für die Errichtung eines Dammbauwerks in der Grube Sondershausen (Sitz 2003) kam Bentonitmauerwerk als Dichtelement zum Einsatz. In

Untersuchungen des IfG (1998 - 2000) wurde die Festigkeit des Mauerwerksverbundes ermittelt und mit dem FDM-Programm FLAC3D unter der Verwendung des Stoffmodells „Ubiquitous Joints“ rechnerisch analysiert.

- Zur modelmäßigen Darstellung von Bitumina und Asphalten ist eine Beschreibung als NEWTONsche Stoffe mit entsprechender Viskosität möglich.
- Die Eigenschaften von Salz- und Sorelbeton sowie Magnesiabinder wurden bei der Errichtung verschiedener Versuchsbauwerke untersucht (Gläss et al. 2008, Meyer et al. 2008, Müller-Hoeppe et al. 2007) und aufgrund der Ergebnisse Stoffmodelle abgeleitet.

37.3 Sachlage am Standort

Das Endlagerkonzept für den Standort Gorleben sieht folgende Verschlussbauwerke vor (Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011a, Müller-Hoeppe 2011b, Linkamp & Müller-Hoeppe 2012):

- Die Schachtverschlüsse in Schacht 1 und 2 umfassen die kompletten Schächte, wobei die langzeitsicherheitsrelevanten Dichtelemente und Widerlager zwischen dem Schachtsumpf und dem Stützring unterhalb des Schachtfundamentes angeordnet sind. Die Baustoffe für die verschiedenen Elemente der Schachtverschlüsse wurden entsprechend dem unterschiedlichen Chemismus der Lösungen aus dem Deckgebirge und aus dem Grubengebäude ausgewählt.
- Die Streckenverschlüsse sind auf der Einlagerungssohle und der Erkundungssohle an der Grenze z2/z3 im Nahbereich der Schächte sowie in der Verbindungsstrecke zwischen den östlichen und westlichen Einlagerungsbereichen angeordnet. Das derzeitige Konzept sieht für jeden Streckenverschluss drei Widerlager und zwei Dichtelemente sowie eine Länge von ca. 150 m vor.
- Ca. 10 m lange Verschlusspfropfen am Ende der Querschläge der Einlagerungsstrecken vor dem Übergang in die Richtstrecke (Funktionen: Trennung der Richtstrecken mit feuchtem Salzgrus-Versatz von den Einlagerungsfeldern mit trockenem Salzgrus-Versatz, günstige Beeinflussung des geochemischen Milieus, betrieblicher Abschluss der Einlagerungsfelder).

Für die Verschlussbauwerke werden entsprechend den jeweiligen Anforderungen die folgenden Baumaterialien vorgesehen (Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011a, Müller-Hoeppe 2011b, Linkamp & Müller-Hoeppe 2012):

- Sorelbeton A1: besteht aus Magnesiumoxid (MgO) als Bindemittel (11,3 %), Steinsalzgrus als Zuschlagstoff (63,7 %) und wird mit Magnesiumchlorid (MgCl₂)-Lösung angemischt (25 %). Das Material hat eine Lösungspermeabilität von 1,0 E-20 bis 1,6 E-19 m² und eine Gaspermeabilität von 7,0 E-18 bis 1,2 E-19 m². Die integrale Permeabilität des Dichtelementes und des angrenzenden Gebirges (inkl. Kontaktfläche und Auflockerungszone) beträgt anfänglich 5,0 E-17 m² und wird sich mit fortschreitender Zeit verringern. Der Sorelbeton A1 wird für Streckenverschlüsse und Verschlusspfropfen sowie für das untere Dichtelement und Widerlager der Schachtverschlüsse vorgesehen.
- Salzbeton TypASSE: besteht aus Hochofenzement (CEM III / B 32,5 N-LH / HS / NA) als Bindemittel (18,3%), Steinsalzgrus als Zuschlagstoff (72 %) und gesättigter NaCl-Lösung zum Anmischen (10 %). Das Material hat eine Lösungspermeabilität von 4,1E-20 bis 8,0 E-21 m² und eine Gaspermeabilität von 6,9E-19 bis 4,4 E-24 m². Die integrale Permeabilität des Dichtelementes im Schacht und des angrenzenden Gebirges (inkl. Kontaktfläche und Auflockerungszone) beträgt anfänglich 7,0 E-19 m² und wird sich mit fortschreitender Zeit verringern. Der Salzbeton TypASSE wird für die mittleren Dichtelemente und Widerlager der Schachtverschlüsse verwendet. Im drainierten Widerlager unterhalb des Bentonitdichtelementes wird ggf. auch Solebeton mit Kiesanteil verwendet.
- Technischer Bischoffit: wird als Aufsättigungsmaterial zwischen den Dichtelementen aus Salzbeton und Sorelbeton in die Speicherschicht der Schachtverschlüsse (sowie in die Schotterverfüllung des angrenzenden Infrastrukturbereiches der 840-m-Sohle) eingebracht.
- Ca-Bentonit (Typ Salzdettfurth): das Material besteht zu 63-70 % aus Erdalkali-Montmorillonit, 12-15 % Quarz, 5-10 % Illit + Chlorit, 5-7 % Feldspäte und 6-12 % Calcit + Dolomit. Das Baumaterial ist ein binäres Gemisch aus einem Grobkorn- (Presslinge 20-30 mm) und einem Feinkornanteil (Granulat 0,5-3 mm). Das Mischungsverhältnis beträgt Presslinge 70-80 % und Granulat 20-30 %. In-situ-Kennwerte für das binäre Gemisch sind: Einbautrockendichte: 1.700-1.750 kg/m³, Wassergehalt < 10 %, Permeabilität: 1,0 E-17 bis 7,8 E-18 m² und Quelldruck 1 MPa. Die integrale Permeabilität des Dichtelementes und des angrenzenden Gebirges (inkl. Kontaktfläche und Auflockerungszone) beträgt anfänglich

1,0 E-17 m² und wird sich mit fortschreitender Zeit verringern. Der Ca-Bentonit ist als Baumaterial für die obersten Schachtdichtelemente vorgesehen, um die Deckgebirgswässer zurückzuhalten.

- Salzgrus wird nicht nur zur Verfüllung des Grubengebäudes eingesetzt, sondern auch als ca. 50 m mächtige "Langzeitdichtelemente" in den Schachtverschlüssen. Dafür wird dem auf 10-12 % Porosität verdichteten Salzgrus vor dem Einbau 1,5 Gew.- % gesättigter NaCl-Lösung zugesetzt. Anfangspermeabilität: 1,0 E-13 bis 1,0 E-15 m². Außerdem wird Salzgrus im obersten Teil des Schachtverschlusses als Aufsättigungsschicht eingebracht.
- Basalt oder Serpentin-Schotter sind als Grundmaterial für setzungsarme und langzeitstabile Widerlager der Schachtverschlüsse sowie als Speicherelemente in den Schächten sowie in den Infrastrukturbereichen auf der 840-m- und der 870-m-Sohle vorgesehen. Die Permeabilität beträgt 1,0 E-7 bis 1,0 E-9 m².

Für die Betonage erforderliche Schalungsmauern können aus Mauerziegeln, Kalksandstein oder Salzbricketts erstellt werden.

Das Design der vorgesehenen geotechnischen Barrieren wird in Müller-Hoeppe (2011a) und Müller-Hoeppe (2011b) beschrieben.

37.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften der eingesetzten Verschlussmaterialien sind für den Langzeitsicherheitsnachweis von großer Bedeutung, da sie die Eigenschaften der Verschlussbauwerke bestimmen. Die Verschlussbauwerke stellen sicher, dass während der Salzgruskompaktion nur geringe Lösungsmengen in das Grubengebäude eindringen und zu den Abfällen gelangen können bzw. dass später nur geringe, möglicherweise kontaminierte Lösungsmengen aus dem Grubengebäude in die Biosphäre gelangen können. Neben den mechanischen Lasten (Gebirgsdruck, Fluidruck, Erdbeben) ist vor allem die Entwicklung des geochemischen Milieus entscheidend für die Langzeitstabilität der Barrieren (Linkamp & Müller-Hoeppe 2012). Daher werden die Baumaterialien so gewählt und das Barrierendesign so ausgelegt, dass diese Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Wichtig für die Funktionalität der Barrieren ist die Gewährleistung einer konstanten Baustoffqualität, der erforderlichen Standortvorbereitung (Entfernung der Auflockerungszone ggf. Vergütung durch Zementinjektionen (oder an-

dere Abdichtmaterialien)) und einem adäquaten Einbau. Dabei ist die Ausbildung von Strömungskanälen (Kanalisation) zu vermeiden. Für die Funktionalität des Bentonitdichteelementes ist eine gleichmäßige Aufsättigung des Baustoffs mit Salzlösung entscheidend.

Nach der vorgesehenen >Funktionsdauer der Barrieren von 50.000 Jahren ist für die oberen Bentonit-Dichteelemente eine Beeinflussung durch die Abkühlung während der Kaltzeiten nicht auszuschließen. Die Abnahme bzw. der Verlust des Bentonitquelldrucks bei Temperaturen unter 0 °C wurde von Birgersson et al. (2010) untersucht. Unterhalb von -5 °C ist der Quelldruck des Bentonits völlig aufgehoben, so dass die Dichtfunktion des Dichteelementes beeinträchtigt wird. Es ist aber durch Modellrechnungen zu untersuchen, ob derartige Temperaturen bei zukünftigen Kaltzeiten in den Gorleben Schächten zu unterstellen sind.

Außerdem ist nicht auszuschließen, dass die oberen Dichteelemente während zukünftiger Kaltzeiten durch glaziale Rinnen zerstört werden.

Weiterhin kann sich im Zuge zukünftiger Kaltzeiten der Chemismus der Grundwässer signifikant ändern. Diese Änderungen der Hydrochemie sind nicht prognostizierbar, aber die Korrosion der Barrierenbaustoffe kann begrenzt werden.

37.5 Zeitliche Beschränkung

Für das FEP gibt es keine zeitlichen Beschränkungen. Die Zusammensetzung eines Verschlussmaterials kann sich durch chemische und ggf. thermische sowie hydraulische Einwirkungen verändern. Die Materialien müssen über den für die jeweilige Barriere vorgesehene Funktionszeit beständig sein und dürfen in diesem Zeitraum ihre für die Langzeitsicherheit zugrunde gelegten Eigenschaften nicht verlieren. Zurzeit wird für Strecken- und Schachtverschlüsse eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren unterstellt. Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle wird in diesem Zeitraum durch die Kombination mehrerer Verschlussbauwerke sichergestellt.

37.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

37.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

37.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

37.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Verschlussmaterial wurde für das Endlagerkonzept festgelegt und ist daher eine Randbedingung.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das FEP beschreibt die Eigenschaften der Verschlussmaterialien, von denen die Konsequenzen externer Einwirkungen auf die Schacht- und Streckenverschlüsse abhängen. Aus dem FEP ergibt sich daher keine direkte Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist im Teilsystem "Strecken und Schächte" zu berücksichtigen.

37.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Glaziale Rinnenbildung

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Kanalisation in Dichtelementen

Quellen des Bentonits

Auflösung und Ausfällung

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Thermische Expansion oder Kontraktion

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Glaziale Rinnenbildung: Die tiefreichende Erosion durch glaziale Rinnenbildung kann die oberen Dichtelemente des jeweiligen Schachtverschlusses erreichen und beeinträchtigt dann die Verschlussmaterialien.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Durch eine Alteration des Baumaterials können die Eigenschaften des Verschlussmaterials verändert werden.

Konvergenz: Die Konvergenz wirkt unmittelbar auf die Verschlussmaterialien der Barrieren.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Quellen des Bentonits: Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien und das Quellen des Bentonits zählen zu den materialspezifischen Eigenschaften der Verschlussmaterialien.

Kanalisation in Dichtelementen, Auflösung und Ausfällung, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Durch eine Kanalisation in Dichtelementen, durch Auflösung und Ausfällung sowie die Korrosion zementhaltiger Stoffe können die mechanische Stabilität und die hydraulischen Eigenschaften des Verschlussmaterials beeinträchtigt werden.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Aus der thermischen Expansion oder Kontraktion durch die wärmeentwickelnden Abfälle oder - im Schacht - durch klimatische Einflüsse kann eine zusätzliche mechanische Last auf das Verschlussmaterial resultieren.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Spannungsverhältnisse im Gebirge wirken in den Barrieren unmittelbar auf das Verschlussmaterial ein.

Bemerkungen:

Lösungen im Grubenbau: Die Lösungen im Grubenbau wirken nur indirekt über das geochemische Milieu und die Alteration auf die Verschlussmaterialien.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Schachtverschlüsse Streckenverschlüsse
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
Sonstige Verschlussbauwerke
Konvergenz
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Lösungen im Grubenbau
Kanalisation in Dichtelementen
Quellen des Bentonits
Auflösung und Ausfällung
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Thermische Expansion oder Kontraktion
Auflockerungszone
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Sorption und Desorption
Kolloide

Begründungen:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Sonstige Verschlussbauwerke, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Die Verschlussmaterialien beeinflussen die Eigenschaften der Schacht- und Streckenverschlüsse sowie der Dichtpfropfen.

Konvergenz: Die mechanische Stabilität der Verschlussmaterialien wirkt der Konvergenz entgegen.

Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien und das Quellen des Bentonits sind materialspezifische Eigenschaften und hängen von der Art der Verschlussmaterialien ab.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Durch die Wahl langzeitstabiler und nicht kompaktierbarer Materialien für die Widerlager (Basalt-/Serpentinittschotter), wird das Risiko von Lageverschiebungen des Schachtverschlusses verringert.

Lösungen im Grubenbau: Durch wasserhaltige Verschlussmaterialien (Bentonit, Zement) werden Lösungen in die Grubenbaue eingebracht.

Kanalisation in Dichtelementen, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Das Auftreten von Kanalisierungen in Dichtelementen sowie eine mögliche Alteration der Verschlüsse hängen von den Eigenschaften des Verschlussmaterials ab.

Auflösung und Ausfällung, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Von den Eigenschaften des Verschlussmaterials und dem Chemismus der auftretenden Lösungen hängt es ab, ob es zur Auflösung einzelnen Baustoffbestandteile und zur Ausfällung gelöster Bestandteile im Porenraum bzw. zur Korrosion zementhaltiger Stoffe kommt.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die thermische Expansion und Kontraktion sowie der Gaseindringdruck werden durch die Eigenschaften des Verschlussmaterials bestimmt.

Auflockerungszone: Die Volumenzunahme von Dichtmaterialien übt einen Druck auf die Auflockerungszone aus und kann so zum Schließen der Risse führen. Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Das in einer Barriere eingebaute Verschlussmaterial erzeugt einen Stützdruck, der zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge führt.

Sorption und Desorption: Im Porenraum des Verschlussmaterials kann es zur Sorption/Desorption gelöster/ausgefällter Stoffe kommen.

Kolloide: Aus der Abrasion zementhaltiger Stoffe können Kolloide resultieren.

Bemerkungen:

Porosität, Permeabilität: Porosität und Permeabilität sind über die Materialeigenschaften der Baustoffe abgedeckt

37.11 Offene Fragen

- Materialoptimierung zur gezielten Beeinflussung der Materialeigenschaften
- Langzeitstabilität der Widerlagerbaustoffe bzw. der Dichtmaterialien
- Übertragbarkeit der Ergebnisse des Bohrschachtversuchs Salzdetfurth auf die Randbedingungen eines Endlagerschachtverschlusses
- Langzeitstabilität von Bitumen

37.12 Literaturquellen

BMBF (2006): „Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“. - Verbundvorhaben Stoff-gesetzvergleich, einzelne Teilberichte mit den Förderkennzeichen 02C1004 bis 02C1054.

Birgersson, M., Karnland, O., Nilsson, E. (2010): Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. - Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-10-40; Stockholm.

Engelhardt, H.J., Kreienmeyer, M., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Köster, R., Eilers, G., Preuss, J. (2003). A constitutive law of salt concrete used for closure of an ULW-repository. Icem03-4570. Proc. ICEM03. 9th Internat. Conf. on radioact. Waste Management and Evironmental Remediation. Sept. 21-25, 2003; Oxford (UK).

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Gläss, F., Mauke, R., Eilers, G., Preuss, J., Schmidt, H., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N. (2005): Investigation of a salt concrete seal in the Asse salt mine. WM 05 Conference, 27.02.-03.03.2005; Tucson (Ariz.).

IfG Leipzig (1998-2000): Standsicherheitsnachweis für das statische Widerlager im Streckenverschlussbauwerk in der EU1 der Grube Sondershausen. - Institut für Gebirgsmechanik; Leipzig.

Kali & Salz (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. - BMBF-Forschungsvorhaben 02C0516, Kali + Salz AG; Kassel.

Korthaus, E. (1998): Experiments on Crushed Salt Consolidation with True Triaxial Testing Device as a Contribution to an EC-Benchmark Exercise (FZKA 6181). - Forschungszentrum Karlsruhe.

Kreienmeyer, M., Lerch, C., Polster, M., Tholen, M. (2008): ISIBEL Abschlussbericht „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“. Aufgabenpaket AP 5 Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-15-2008-AP; Peine.

Linkamp, M., Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J. (2012): Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgsässer. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Mauke, R., Schmidt, H. (2003): Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse. - BfS/DBE, Vortrag beim 32. Geomechanik-Kolloquium; Leipzig.

Meyer, T., Teichmann, L., Heydorn, M. (2008): Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Tagung "Messen in der Geotechnik", 23.-24.10. 2008.

Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2002): Closure Concept for the Morsleben LLW Repository for Radioactive Waste. Design of the Drift Seals in a former Salt Mine. -Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case. Workshop Proceedings; Oxford, UK.

Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2003): Repository Seal Requirements and Design,- EBS-Design Requirements and Constraints., Workshop; Turku, Finland.

Müller-Hoeppe, N., Jobmann, M., Polster, M., Schmidt, H. (2007): The role of structural reliability of geotechnical barriers of an HLW / SF repository in salt rock within the safety case. OECD / NEA Symposium on "Safety cases for deep disposal of radioactive waste - where do we stand?", 23.-25.01.2007; Paris.

Müller-Hoeppe, N. (2011a): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N. (2011b): Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse - Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und A). Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M. (2012a): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren –Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Sitz, P. (1981): Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen. - Freiburger Forschungshefte, VEB Verlag für Grundstoffindustrie; Freiberg.

Sitz, P. (2001): Langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar. - 5. Statusgespräch zu FuE Vorhaben; Leipzig.

Sitz, P. (2003): Forschungsvorhaben: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Verschlussbauwerke für UTD im Salinar. Bau und Test eines Verschlussbauwerks unter realen Bedingungen. - TU-BAF.

38 Schachtverschlüsse (2.1.05.02)

38.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Aufbau sowie die physikalischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften der Schachtverschlüsse.

38.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Vielfältige Erfahrungen beim Verschluss von Schächten liegen aus dem norddeutschen Steinsalz- und Kalibergbau vor. So wurden z. B. im Rahmen der Verwahrung von Kalischächten im Südharz-Kalirevier verschiedene Verschlusskonzepte für Schächte entwickelt, die sich an der standortspezifischen geologischen Situation und an den bergrechtlichen Anforderungen orientiert haben (Bodenstein et al. 2002).

Weitergehende Anforderungen bestehen an die Eigenschaften der Schachtverschlüsse von Untertagedeponien und Endlagern für radioaktive Abfälle. Die Schächte stellen direkte Verbindungen zwischen dem Infrastrukturbereich und der Biosphäre dar und müssen daher durch Verschlussbauwerke verschlossen werden, um einen Lösungszutritt zu den Abfällen und eine Freisetzung kontaminierter Lösungen über den Schacht zu verhindern. Grundsätzliche Anforderungen an Schachtverschlüsse umfassen:

- Kompatibilität mit dem umgebenden Wirtsgestein
- Beständigkeit gegen Deckgebirgslösungen und gegen saline Wässer aus Einschlüssen des Wirtsgesteins,
- mechanische Stabilität,
- geringe hydraulische Durchlässigkeit der Dichtelemente, und
- Langzeitbeständigkeit der Materialien und der Konstruktion, damit die definierten Barriereigenschaften über die geplante Funktionsdauer erhalten bleiben.

Bei einem Endlager im Salz müssen die Schachtverschlüsse einen Lösungszutritt zu den Einlagerungsbereichen solange verhindern bis der Salzgrusversatz in den Strecken soweit kompaktiert ist, dass er die Dichtfunktion übernimmt. Die Untersuchungen zu den meisten Schachtverschlusskonzepten für Endlager sind bislang über das Pla-

nungsstadium bzw. über die Untersuchung einzelner Barrierenkomponenten nicht hinausgekommen. Beispiele für fortgeschrittene Projekte sind demgegenüber:

Im Rahmen des FuE-Projektes Schachtverschluss Salzdetfurth wurde aber in einem Kalibergwerk ein Schachtverschlusskonzept für Untertagedeponien entwickelt und erprobt (Breidung 2002a, 2002b). Das hier realisierte Verschlussbauwerk besaß ein gleitfähiges Dichtelement im oberen Salinarbereich, welches auf einer setzungsarmen Verfüllsäule als statisches Widerlager aufsetzt. Für das Stützelement wurde Hartgesteinschotter (Basalt) und für das Dichtelement ein Ca-Bentonit verwendet, der bei Flüssigkeitszutritt aufquillt und den Schachtquerschnitt abdichtet. Während für den Bentonit die Langzeitbeständigkeit nachgewiesen wurde, wird die Langzeitbeständigkeit von Basaltschotter in $MgCl_2$ -reicher Lösung kontrovers diskutiert und als Alternative Serpentinitschotter vorgeschlagen.

Das in Salzdetfurth erprobte Konzept erfüllt die Anforderungen an eine weitgehende Flüssigkeitsdichtheit und eine Langzeitbeständigkeit. Die Eignung von Bentonit als Dichtelement für langzeitsichere Schachtverschlüsse wurde, unter Berücksichtigung von Salzton als natürlichem Analogon, auch durch weitere Untersuchungen bestätigt (Gruner et al. 2003, Sitz et al. 2001, 2004). Die Transportprozesse von Gas durch die Bentonitbarriere werden noch erforscht, aber es steht fest, dass der Verschluss nicht vollständig gasdicht ist (Jockwer et al. 2000).

Für die Stilllegung des Endlagers Morsleben (ERAM) wurde ein Schachtverschlusskonzept entwickelt, das teilweise von den Ergebnissen des FuE-Vorhabens Salzdetfurth Kredit nimmt (Rauche et al. 2004). Hier wird zusätzlich noch Asphalt/Bitumen als Dichtmaterial eingesetzt und die untere Widerlagersäule mit Zementsuspension verfestigt.

Das Schachtverschlusskonzept für das amerikanische Endlager WIPP für Transuran-Abfälle aus militärischen Anlagen in einer flach lagernden Salzformation sieht insgesamt 13 Schachtverschlüsselemente vor, die aus Beton, Bentonit, Salzgrus und Asphalt bestehen (Daemen & Ran 1996, Sandia 2002).

Zur rechnerischen Analyse der Schachtverschlüsse im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises ist die Kenntnis von geeigneten Stoffmodellen und von natürlichen Analoga notwendig, damit einerseits ein Nachweis der Tragfähigkeit und Dichtheit geführt werden kann und andererseits davon entkoppelt die Beständigkeit des jeweiligen

Verschlussbauwerks nachgewiesen werden kann. Entsprechende Untersuchungen wurden für das FuE-Vorhaben Salzdetfurth durchgeführt (Breidung 2002b). Salz- und Sorelbeton sowie Magnesiabinder wurden im Rahmen verschiedener FuE-Projekte sowie der Errichtung von Versuchsbauwerken untersucht (Gläss et al. 2008, Meyer et al. 2008, Müller-Hoeppe et al. 2007) und aufgrund der Ergebnisse Stoffmodelle abgeleitet.

38.3 Sachlage am Standort

Entsprechend den bergrechtlichen Anforderungen umfassen die Schachtverschlüsse im Bergbau die gesamte Schachtröhre. Langzeitsicherheitlich relevant ist aber nur der unterhalb der Stützringe (entspricht ca. 93 m unter dem Salzspiegel) beginnende untere Teil, der aus Dichtelementen und Widerlagern besteht. Der obere Teil wird nach berg- und wasserrechtlichen Anforderungen gestaltet. Seine Hauptaufgabe ist die mechanische Stabilisierung der Schachtsäule und die Vermeidung der Entstehung von hydraulischen Kurzschlüssen zwischen unterschiedlichen Grundwasserstockwerken. Daher wird die obere Schachtsäule so verfüllt, dass sie die geologische Abfolge im umgebenden Gebirge nachahmt.

Bei der folgenden Diskussion wird der Begriff „Schachtverschluss“ nur auf den unteren, langzeitsicherheitlich relevanten Teil beschränkt und der obere Teil nicht berücksichtigt.

Das Endlagerkonzept für den Standort Gorleben sieht folgende Verschlussbauwerke vor (Bollingerfehr et al. 2011, Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011a, Müller-Hoeppe 2011b):

- Schachtverschlüsse bestehend aus Dichtelementen und Widerlagern im unteren Teil der Schachtröhre bis zum Stützring unterhalb der Schachtfundamente sowie einer Verfüllung im oberen Teil der Schächte
- Streckenverschlüsse auf der Einlagerungssohle und der Erkundungssohle
- Dichtpfropfen am Ende der Querschläge der Einlagerungsfelder vor dem Übergang in die Richtstrecke

Die Anordnung der Dichtelemente und Widerlager der Schachtverschlüsse werden an die geologische Situation in den Schächten angepasst. So werden die Dichtelemente

so angeordnet, dass sie nicht nur den vertikalen Fluidstrom über den Schacht verhindern, sondern gleichzeitig dichten sie die Ausstreichbereiche der häufig lösungsführenden Gorleben-Bank an der Schachtkontur ab. Außerdem wurden die Baustoffe der diversitären Schachtverschlusskomponenten entsprechend dem Chemismus der zutretenden Deckgebirgslösungen, alterierten Lösungen und der Lösungen aus dem Grubengebäude ausgewählt (Xie & Herbert 2012). Im Einzelnen sind folgende Komponenten vorgesehen (Beispiel Schacht Gorleben 1: Anordnung der Schachtverschlusselemente vom Schachtsumpf (933,0 m) bis zu den Stützringen des Schachtausbaus (349,0 m):

- Das untere Widerlager (ca. 57 m) und das 3. Dichtelement (ca. 30 m) bestehen aus Sorelbeton A1. Die anfängliche, integrale Permeabilität des Dichtelementes beträgt $5,0 \text{ E-}17 \text{ m}^2$.
- Oberhalb des 3. Dichtelementes folgt eine Widerlager/Speicherschicht aus Basalt-/Serpentinit-Schotter (66 m) mit einer Permeabilität von $1,0 \text{ E-}7$ bis $1,0 \text{ E-}9 \text{ m}^2$. Hier wird zur Aufsättigung der zutretenden Lösungen technischer Bischoffit eingebracht.
- Nach oben schließen sich ein unteres Widerlager (ca. 25 m) und das 2. Dichtelement (ca. 70 m), ein oberes Widerlager (ca. 25 m) und eine Opferschicht (ca. 10 m) an, die alle aus Salzbeton bestehen. Die anfängliche, integrale Permeabilität des Dichtelementes beträgt $7,0 \text{ E-}19 \text{ m}^2$.
- Die Opferschicht wird von einer "Langzeitdichtung" aus angefeuchtetem Salzgrus (ca. 50 m, 1,5 % gesättigte NaCl-Lösung) überlagert. Die Anfangspermeabilität beträgt $1,0 \text{ E-}13$ bis $1,0 \text{ E-}15 \text{ m}^2$.
- Es folgt wieder eine Basalt-/Serpentinit-Schottersäule (ca. 127,5 m) als Widerlager;
- dann ein im Gebirge verankertes, drainiertes Widerlager aus Salzbeton (ca. 12,5 m, kein hydraulischer Widerstand) und eine ca. 14 m mächtige Filterschicht aus Kies und Sand (Permeabilität der Filterschicht beträgt $1,0 \text{ E-}10$ bis $1,0 \text{ E-}12 \text{ m}^2$).
- Das oberste, ca. 60 m mächtige, Dichtelement besteht aus Ca-Bentonit. Die anfängliche, integrale Permeabilität des Dichtelementes beträgt höchstens $5,0 \text{ E-}17 \text{ m}^2$.
- Oberhalb des 1. Dichtelementes folgt wieder eine Filterschicht (ca. 36,5 m), die aus Basaltsplitt ggf. aus Kies und Sand besteht.

Im Bereich der Dichtelemente wird jeweils die Auflockerungszone an der Schachtwandung bis auf ca. 10 cm entfernt.

Ein analoges Schachtverschlusskonzept ist für den Schacht 2 vorgesehen, aber die Anordnung der einzelnen Komponenten wird an die Standortgeologie angepasst.

In-situ-Versuche haben gezeigt, dass sich die anfängliche Permeabilität der Dichtelemente durch die Einspannung im Gebirge weiter reduzieren wird. Weitere Details des Barrierendesigns sind in Engelhardt et al. (2011), Müller-Hoeppe (2011a) beschrieben. Die Schachtverschlüsse werden für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt.

Die Lastannahmen für die Auslegung der Schachtverschlüsse umfassen die litho- und hydrostatischen Drucke, hydrochemische Einwirkungen durch verschiedene Deckgebirgs- und Wirtsgesteinslösungen sowie alterierte Lösungen, das Bemessungserdbeben (7,3 MSK), die thermomechanischen Spannungen durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle, erhöhte hydrostatische Drucke durch eine Meeresüberflutung (ca. 50 m) infolge einer Klimaerwärmung sowie Salzstockbewegungen (Diapirismus). In sinngemäßer Übertragung der Anforderungen der KTA 2201 ist bei Auftreten des Bemessungserdbebens eine Beschädigung der Barrieren z. B. durch Setzungen der Schottersäulen und resultierende Lageverschiebungen des Schachtverschlusses zulässig, doch muss die Dichtfunktion der Barriere weiter gewährleistet sein.

38.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Schachtverschlüsse sind wesentliche Elemente des Sicherheits- und Endlagerkonzeptes, die einen Lösungszutritt aus dem Deckgebirge zu den Abfällen und eine Freisetzung kontaminierter Lösungen und Gasen über den Schacht verhindern bzw. begrenzen. Die Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Schachtverschlüsse wird durch die geotechnischen Integritätsnachweise und durch die Radionuklid-Transportrechnungen gezeigt.

Während der zukünftigen Kaltzeiten ist eine Beeinträchtigung der Funktion der oberen Teile der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen und auch eine Beeinträchtigung der Funktion der anderen Dichtelemente durch Korrosion infolge eines geänderten Chemismus der zutretenden Lösungen möglich. Eine Prognose der kaltzeitlichen Entwicklungen und ihrer Auswirkungen auf die Funktion der Schachtverschlüsse ist mit

großen Ungewissheiten behaftet. Da diese Entwicklungen aber erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auftreten, sind sie sicherheitstechnisch nicht relevant.

38.5 Zeitliche Beschränkung

Die Schachtverschlüsse müssen einen Lösungszutritt aus dem Deckgebirge zu den Abfällen bzw. eine Freisetzung kontaminierter Lösungen verhindern bzw. begrenzen, bis die Salzgruskompaktion so weit fortgeschritten ist, dass der Salzgrus die Dichtfunktion übernehmen kann. Obwohl erwartet wird, dass der Salzgrus in wenigen 1.000 Jahren kompaktiert sein wird, wird für die Auslegung der Schachtverschlüsse eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt, um mögliche Ungewissheiten in der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems abzudecken. Der Nachweis der Barrierefunktion im Hinblick auf die Einhaltung der Auslegungsanforderungen während der vorgesehenen Funktionsdauer erfolgt durch die geotechnischen Integritätsnachweise.

Während der zukünftigen Kaltzeiten ist eine Beeinträchtigung der Funktion der oberen Teile der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen und auch eine Beeinträchtigung der Funktion der anderen Dichtelemente durch Korrosion infolge eines geänderten Chemismus der zutretenden Lösungen möglich. Da diese Entwicklungen aber erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auftreten, sind sie sicherheitstechnisch nicht relevant.

38.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

38.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

38.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

38.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Schachtverschlüsse sind Teil des Endlagerkonzeptes Gorleben und damit Randbedingungen für den Sicherheitsnachweis.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das FEP beschreibt die Verschluss-Eigenschaften, von denen die Konsequenzen externer Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse abhängen. Aus dem FEP ergibt sich daher keine direkte Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP beschreibt Komponenten des Schachtes und ist daher im Teilsystem "Strecken- und Schächte" berücksichtigt.

38.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben

Diapirismus

Subrosion

Glaziale Rinnenbildung

Verschlussmaterial

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Fluiddruck

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Kanalisation in Dichtelementen

Quellen des Bentonits

Thermische Expansion oder Kontraktion

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Erdbeben: Ein Erdbeben kann zu Setzungen im Schotter (Widerlager der Schächte) und zu Rissbildungen im Beton der Barrieren führen.

Diapirismus: Der Diapirismus kann zu Verschiebungen des Schachtverschlusses im Wirtsgestein führen.

Subrosion, glaziale Rinnenbildung: Durch Subrosion und durch glaziale Rinnenbildungen kann die Funktion der oberen Dichtelemente der jeweiligen Schachtverschlüsse beeinträchtigt werden.

Verschlussmaterial: Die Eigenschaften der Verschlussmaterialien beeinflussen die Eigenschaften der Schachtverschlüsse.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Durch eine Alteration des Baumaterials können die Eigenschaften der Schachtverschlüsse verändert werden.

Konvergenz: Durch die Konvergenz des Gebirges werden die Verschlussbauwerke eingespannt

Fluiddruck: Der Fluiddruck ist eine hydraulische Last, die auf die Schachtverschlüsse einwirkt.

Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien, Quellen des Bentonits: Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien und das Quellen des Bentonits beeinflussen die Eigenschaften der Schachtverschlüsse.

Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses, Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Bei einem vorzeitigen Versagen des Schachtverschlusses oder bei einer zu großen Lageverschiebung des Schachtverschlusses ist die Funktion des Schachtverschlusses beeinträchtigt.

Kanalisation in Dichtelementen: Durch eine Kanalisation in Dichtelementen werden die mechanische Stabilität und die hydraulischen Eigenschaften der Schachtverschlüsse beeinträchtigt.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Eine zusätzliche mechanische Last auf die Barrieren kann aus der thermischen Expansion und Kontraktion durch die wärmeentwickelnden Abfälle und im Schacht durch klimatische Entwicklungen resultieren. Auflockerungszone: Die Auflockerungszone beeinflusst wesentlich die hydraulischen Eigenschaften des Schachtverschlusses.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Spannungen im Gebirge wirken unmittelbar auf die Schachtverschlüsse ein.

Bemerkungen:

Lösungen im Grubenbau, geochemisches Milieu, Auflösung und Ausfällung, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Die genannten FEP wirken alle indirekt über die Alteration von Schacht- und Streckenverschlüssen auf die Schachtverschlüsse.

Wirtsgestein: Das Wirtsgestein wirkt indirekt über Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen sowie Konvergenz auf die Schachtverschlüsse.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Permeabilität

Kanalisation in Dichtelementen

Quellen des Bentonits

Gaseindringdruck

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Kanalisation in Dichtelementen, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Das Auftreten von Kanalisationen in Dichtelementen sowie eine mögliche Alteration der Verschlüsse werden durch die Eigenschaften der Schachtverschlüsse beeinflusst.

Konvergenz: Die Verschlussbauwerke bauen einen Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien, Quellen des Bentonits: Das Abfließen und die Ausprägung nicht thermisch induzierter Volumenänderungen von Materialien und des Quellens des Bentonits werden durch die Eigenschaften der Schachtverschlüsse beeinflusst.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: Das Design der Schachtverschlüsse wird so gestaltet, dass das Risiko eines vorzeitigen Versagens der Schachtverschlüsse gering gehalten wird.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Durch das Design der Schachtverschlüsse kann das Risiko von Lageverschiebungen des Schachtverschlusses verringert werden.

Gaseindringdruck, Permeabilität: Die Eigenschaften der Schachtverschlüsse bestimmen den Gaseindringdruck und die integrale Permeabilität.

Auflockerungszone: Der Stützdruck durch den Schachtverschluss kann zum Verschließen der Risse in der Auflockerungszone führen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Außerdem kann der Stützdruck des Schachtverschlusses zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge führen.

Bemerkungen:

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die thermische Expansion oder Kontraktion wirkt indirekt über die Verschlussmaterialien.

38.11 Offene Fragen

Schachtverschlusskonzept für den Schacht 2.

38.12 Literaturquellen

Bodenstein, J. et al. (2002): Zehn Jahre Schachtverwahrung im Südharz-Kalirevier. Erfahrungen aus der Sicht von Planung und Ausführung . - Glückauf 138, 4/2002; Essen.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Breidung, K. (2002a): Verwahrung von Kali- und Steinsalzbergwerken einschließlich langzeitsicherer Schachtabdichtungen. - Kali u. Steinsalz, 02/2002: 28-39; Kassel.

Breidung, K. (2002b): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. - BMBF-gefördertes Vorhaben, Kennz.: 02C0516, Kali u.Salz GmbH; Kassel.

BMBF (2006): „Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“. - Verbundvorhaben Stoff- gesetz- vergleich, einzelne Teilberichte mit den Förderkennzeichen 02C1004 bis 02C1054.

Daemen, J.J.K., Ran, C. (1996): Bentonit as a Waste Isolation Pilot Plant Shaft Sealing Material. - Sandia National Laboratories, SAND 96-1968; Washington.

Engelhardt, H.J., Kreienmeyer, M., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Köster, R., Eilers, G., Preuss, J. (2003). A constitutive law of salt concrete used for closure of an ULW-repository. Icem03-4570. Proc. ICEM03. 9th Internat. Conf. on radioact. Waste Management and Environmental Remediation. Sept. 21-25, 2003; Oxford (UK).

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Gläss, F., Mauke, R., Eilers, G., Preuss, J., Schmidt, H., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N. (2005): Investigation on a salt concrete seal in the Asse salt mine. - WM05 Conference, 27.02. - 03.03.2005; Tucson (Arizona).

Gruner, M., Schwandt, A., Sitz P. (2003): Salztön - Natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar. - Kali u. Steinsalz, 2/2003: 12-17; Kassel.

Jockwer, N., Miehe, R., Müller-Lyda, I. (2000): Untersuchungen zum Zweiphasenfluss und diffusen Transport in Tonbarrieren und Tongesteinen. - GRS-167, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

KTA 2201 (1990): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen. Teil 1: Grundsätze, Teil 2: Baugrund, Teil 3: Auslegung der baulichen Anlagen. - Sicherheitstechnische Regel des kerntechnischen Ausschusses (KTA), Fassung Juni 1990.

Meyer, T., Teichmann, L., Heydorn, M. (2008): Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Tagung "Messen in der Geotechnik", 23. - 24.10. 2008.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N. (2011a): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N. (2011b): Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse - Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und A). Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M. (2012a): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren –Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Jobmann, M., Polster, M., Schmidt, H. (2007): The role of structural reliability of geotechnical barriers of an HLW / SF repository in salt rock within the safety case. OECD / NEA Symposium on "Safety cases for deep disposal of radioactive waste - where do we stand?", 23.-25.01.2007; Paris.

Rauche, H., Sitz, P., Lippmann, G., Wagner, K., Lukas, V., Rumphorst, K., Wellmann, P.L., Preuss, J. (2004): Closure of the Morsleben repository - Conceptual Design and Safety Proof of Shaft Sealing Systems. - 26-28. April 2004, DisTec-Conference.

SANDIA National Laboratories (2002): Waste Isolation Pilot Plant, Shaft Sealing System Compliance Submittal Design report. Attachment 12. Repository Isolation Systems Department; Albuquerque (US).

Sitz, P., Elert, K.-H., Schwandt, A., Gruner, M.G. (2001): Salztone als natürliche Analoga für Bentonit - Dichtelemente im salinaren Gebirge. - Exkursionsföh.u.Veröffentl. GGW, 211 (2001): 5-1; Berlin.

Sitz, P., Gruner, M., Rumphorst, K. (2004): Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar. - Kali u. Steinsalz, 1/2004: 7-13; Kassel.

Xie, M., Herbert, H.J. (2012): The Preliminary Safety Analysis for Gorleben (VSG). Geochemical analysis of the sealing system (work package 9.1.2). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

39 Streckenverschlüsse (2.1.05.03)

39.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Aufbau sowie die physikalischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften der Streckenverschlüsse.

39.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Aufgabe der Streckenverschlüsse ist es, die Verbindungsstrecken von den Schächten zu den Einlagerungsbereichen des Endlagers an definierten Positionen abzudichten. Die meisten Konzepte sehen ein redundantes und/oder diversitäres Verschlussbauwerk vor.

Erfahrungen bezüglich der Errichtung und der Funktionalität von Streckenverschlüssen liegen von Dammbauwerken des Kali- und Steinsalzbergbaus, deren Errichtung im Rahmen des Abwerfens von Feldesteilen und/oder infolge von Laugeneinbrüchen notwendig war (z. B. Leopoldshall: Wagner 2005, Sachsen-Weimar: Lohmann 1930, Immenrode: Aland et al. 1999), von Versuchsbauwerken in den Bergwerken Hope (Fischle et al. 1987), Sondershausen (Sitz et al. 1999, 2003) und Teutschenthal (Knoll et al. 2010) sowie Pilotbarrieren und Strömungsbarrieren im Bergwerk Asse (Gläß et al. 2005, Meyer et al. 2008) sowie im Endlager Morsleben (zurzeit laufender Versuch) vor.

An die Streckenverschlüsse in einem Endlager bestehen folgende funktionale Anforderungen:

Betriebsphase:

- die Streckenverschlüsse sind frühzeitig vor Ablauf der Betriebsphase zu errichten, damit ihre Dichtfunktion mit Beginn der Nachverschlussphase gewährleistet ist,
- die Streckenverschlüsse sind im Rückbau zu errichten,
- die Streckenverschlüsse müssen so hergestellt werden, dass sie die sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllen. Dabei sind qualitätsgesicherte Verfahren anzuwenden.

Nachverschlussphase:

- sicherheitstechnische Anforderungen zur Gewährleistung der Einhaltung der radiologischen Schutzziele,
- standsicher gegen Gebirgsdruck,
- standsicher gegen mögliche Störfallmedien/Gewährleistung der Tragfähigkeit bei nur einseitiger Belastung der Stirnflächen,
- technisch dicht gegenüber Fluiden,
- Langzeitbeständigkeit der Baumaterialien und der Konstruktion gegenüber korrosiven Fluiden,
- einfache Wirkprinzipien der Bauteile,
- erprobte Komponenten/Bauteile,
- langfristig immer sicherer Zustand hinsichtlich Dichtigkeit und Standsicherheit (positiv überkritisches Verhalten),
- thermische Stabilität der verwendeten Baumaterialien

Alle Streckenverschlüsse bestehen aus Widerlagern und Dichtelementen, wobei deren Ausgestaltung im Einzelnen differiert. In allen Fällen wurde die Auflockerungszone an der Streckenkontur vor der Errichtung der Barriere so weit wie möglich entfernt und vorhandene Risse durch Injektionen von Dichtmaterialien verschlossen. Die folgenden Baustoffe wurden bisher auf ihre Eignung als Barrierenbaustoffe im Salinar untersucht:

- Salzgrus, Salzbriketts/-blöcke
- SVV (= selbstverheilender Salzversatz, Entwicklung GRS, Herbert et al. 2011)
- AISKRISTALL (bei Einbau erhärtende Evaporitminerale, Entwicklung DBE TECHNOLOGY GmbH, Bollingerfehr et al. 2006)
- Basalt (Widerlager)
- Bitumen/Asphalt
- Bentonit
- MgO-Beton mit Hartgesteinszuschlag (Sorelbeton)

- MgO-Beton mit Salzzuschlag (Salzbeton)
- modifizierter Spülversatz

Entsprechend den unterschiedlichen Baustoff-spezifischen Eigenschaften werden in vielen Streckenverschlusskonzepten unterschiedliche Baustoffe für Dichtelemente und Widerlager verwendet. Außerdem soll durch die Diversifizierung der Baustoffe auch die Widerstandsfähigkeit gegen unterschiedliche zutretende Lösungen erhöht werden. Die auf der Asse und im ERAM errichteten Versuchsbauwerke bestehen aus Sorelbeton bzw. aus Salzbeton.

Zur rechnerischen Analyse der Streckenverschlüsse im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises ist die Kenntnis von geeigneten Stoffmodellen und von natürlichen Analoga notwendig, damit einerseits ein Nachweis der Tragfähigkeit und Dichtheit geführt werden kann und andererseits davon entkoppelt die Beständigkeit des jeweiligen Verschlussmaterials nachgewiesen werden kann. So wurde die modellmäßige Beschreibung der materialspezifischen Eigenschaften von Salz- und Sorelbetonen sowie Magnesiabinder im Rahmen verschiedener FuE-Projekte untersucht (Gläss et al. 2008, Meyer et al. 2008, Müller-Hoeppe et al. 2007) und aufgrund der Ergebnisse Stoffmodelle abgeleitet (Engelhardt et. 2003, BMBF 2006.).

39.3 Sachlage am Standort

Das Endlagerkonzept für den Standort Gorleben sieht folgende Verschlussbauwerke vor (Bollingerfehr et al. 2011, Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011a, Müller-Hoeppe 2011b):

- Die für die Langzeitsicherheit relevanten Teile der Schachtverschlüsse in Schacht 1 und 2 reichen vom Schachtsumpf bis zum Stützring unterhalb des Schachtfundamentes und bestehen aus mehreren Dichtelementen und Widerlagern.
- 4 Streckenverschlüsse auf der 870-m-Einlagerungssohle und 2 Streckenverschlüsse auf der 840-m-Erkundungssohle
- Dichtpfropfen am Ende der Querschläge vor dem Übergang in die Richtstrecke

Außerdem werden die Strecken mit Salzgrusversatz (in den Einlagerungsfeldern und Querschlägen mit trockenem und in den Richtstrecken mit feuchtem Salzgrus) verfüllt.

Die Infrastrukturbereiche der Erkundungs- und Einlagerungssohle werden vom Füllort bis zu den Streckenverschlüssen mit Basalt- oder Serpentinitschotter versetzt. Außerdem ist vorgesehen, auf der Erkundungssohle bereichsweise Aufsättigungsmaterial einzubringen

Die Anforderungen an die Funktion der Streckenverschlüsse sind wie folgt definiert:

Die Streckenverschlüsse müssen so lange gegen zutretende bzw. abfließende Fluide dicht sein (mittlere integrale Permeabilität $5,0 \text{ E-}17 \text{ m}^2$ über das Verschlussbauwerk einschließlich der Kontaktzone zum Gebirge und der angrenzenden Auflockerungszone), bis der Streckenversatz aus Salzgrus soweit kompaktiert ist und die Auflockerungszone soweit zurückgebildet wurde, dass sie eine ähnlich niedrige hydraulische Leitfähigkeit wie das umgebende Salzgestein aufweisen.

Für die Streckenverschlüsse ist folgendes Baumaterial vorgesehen (Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011a, Müller-Hoeppe 2011b):

Sorelbeton A1: besteht aus Magnesiumoxid (MgO) als Bindemittel (11,3 %), Steinsalzgrus als Zuschlagstoff (63,7 %) und wird mit Magnesiumchlorid (MgCl_2)-Lösung angemischt (25 %). Aus dem Material hergestellte Baukörper haben eine Lösungs- und Gaspermeabilität von $1,0 \text{ E-}20$ bis $1,6 \text{ E-}19 \text{ m}^2$ bzw. $7,0 \text{ E-}18 \text{ m}^2$ bis $1,2 \text{ E-}19 \text{ m}^2$ (Engelhardt et al. 2010).

Die Einbauorte der Streckenverschlüsse befinden sich jeweils im Hauptsalz möglichst dicht zu den Schächten, aber mit ausreichendem Abstand zum Kaliflöz Staßfurt und zum Hauptanhydrit. Auf der 870-m-Sohle sind die 4 Streckenverschlüsse in den Bergbautransportstrecken E und W, in der Gebindettransportstrecke sowie in der nördliche Verbindungsstrecke zwischen dem West- und dem Ostflügel des Endlagers angeordnet (Bollingerfehr et al. 2011). Die zwei Streckenverschlüsse auf der 840-m-Sohle sind in den Querschlägen West 1 und Ost 1 angeordnet.

Die Streckenverschlüsse bestehen jeweils aus zwei ca. 50 m langen Dichtelementen, die an den beiden Enden durch 13,6 bzw. 15,2 m starke Widerlager und in der Mitte durch ein doppeltes Widerlager (27,2 m bzw. 30,4 m stark) in ihrer Position gehalten werden (Müller-Hoeppe 2011b). Aus den zwei Dichtelementen ergibt sich eine Redundanz der Dichtfunktion. Die Widerlager werden zwischen 0,75 m starken Schalungsmauern aus Mauerziegeln, Kalksandstein oder Salzbriketts angeordnet. Die Länge der

Barrieren schwankt zwischen 143 – 165 m. Für die Betonage der Barriere werden aus einem Streckenstummel mit vertikal nach oben gerichtetem Hohlraum (Überhauen) zwei Bohrungen – eine Verfüll- und eine Entlüftungs- bzw. Reservebohrung – gestoßen. Die Errichtung der Barrieren erfolgt qualitätsgesichert, wobei durch eine entsprechende Bautechnik gewährleistet wird, dass die Rissbildung beschränkt ist und sich keine Fließkanäle (Kanalisation) im Beton ausbilden können. Vor der Errichtung wird an den Einbaulokationen der Dichtelemente jeweils die Auflockerungszone so weit wie möglich entfernt. Nach In-situ-Untersuchungen kann die Auflockerungszone durch den Nachschnitt auf 10 cm reduziert werden. Um die Neubildung der Auflockerungszone zu begrenzen, soll die freie Standzeit der nachgeschnittenen Strecke auf drei Monate beschränkt sein. Soweit offene Risse und Klüfte im Gestein auftreten, können diese durch Injektionen mit Dichtmaterialien verschlossen werden.

Die Lastannahmen für die Auslegung der Streckenverschlüsse umfassen die litho- und hydrostatischen Drücke, hydrochemische Einwirkungen durch Deckgebirgslösungen, die über den Schacht zutreten sind, oder Wirtsgesteinslösungen, das Bemessungs-erdbeben (7,3 MSK), die thermomechanischen Spannungen durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle sowie Salzstockbewegungen (Diapirismus) (Müller-Hoeppe et al. 2012a, Müller-Hoeppe et al. 2012b). Die Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Streckenverschlüsse wird durch die geotechnischen Integritätsnachweise und durch die Radionuklidtransportrechnungen gezeigt.

39.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Streckenverschlüsse sind wesentliche Elemente des Endlagerkonzeptes, die einen Lösungszutritt zu den Abfällen und eine Freisetzung kontaminierter Lösungen verhindern bzw. begrenzen sollen. Daher wurde der Baustoffchemismus entsprechend dem Chemismus der alterierten Lösungen, die über den Schacht und den Infrastrukturbereich zutreten können, und den Lösungen, die möglicherweise aus den Einlagerungsbereichen durch den feuchten Salzgrus schachtwärts strömen, ausgewählt. Weiterhin wird das Bauwerk gemäß den mechanischen und hydraulischen Lastfällen ausgelegt. Die Gewährleistung der Barrierenfunktion während der vorgesehenen Funktionsdauer wird durch die Redundanz der Dichtelemente unterstützt. Die Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Streckenverschlüsse wird durch die geotechnischen Integritätsnachweise und durch die Radionuklidtransportrechnungen gezeigt.

39.5 Zeitliche Beschränkung

Die Streckenverschlüsse sollen einen Lösungszutritt zu den Abfällen bzw. eine Freisetzung kontaminierter Lösungen behindern bzw. beschränken, bis die Salzgruskompaktion in den Strecken so weit fortgeschritten ist, dass der Salzgrus die Dichtfunktion übernehmen kann. Obwohl erwartet wird, dass der Salzgrus in wenigen 1.000 Jahren kompaktiert ist, werden die Verschlüsse für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt. Dadurch sind mögliche Ungewissheiten in der Prognose der künftigen Systementwicklung abgedeckt.

39.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

39.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

39.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

39.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Streckenverschlüsse sind Teil des Endlagerkonzeptes Gorleben und damit Randbedingungen für den Sicherheitsnachweis.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das FEP beschreibt die Verschluss-Eigenschaften, von denen die Konsequenzen externer Einwirkungen auf die

Streckenverschlüsse abhängen. Aus dem FEP ergibt sich daher keine direkte Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: "Streckenverschlüsse" sind Komponenten, die in den Strecken eingebaut werden. Daher ist das FEP im Teilsystem "Strecken und Schächte" zu berücksichtigen.

39.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben

Diapirismus

Verschlussmaterial

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Fluiddruck

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Kanalisation in Dichtelementen

Thermische Expansion oder Kontraktion

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Erdbeben: Ein Erdbeben kann zu Rissbildungen im Beton der Barrieren führen.

Diapirismus: Der Diapirismus kann zu Verschiebungen der Barriere im Wirtsgestein führen.

Kanalisation in Dichtelementen, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Das Auftreten von Kanalisationen in Dichtelementen sowie eine mögliche Alteration der Verschlüsse werden durch die Eigenschaften der Schachtverschlüsse beeinflusst.

Konvergenz: Die Verschlussbauwerke bauen einen Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien: Das Ablaufen und die Ausprägung nicht thermisch induzierter Volumenänderungen von Materialien werden durch die Eigenschaften der Streckenverschlüsse beeinflusst.

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: Das Design der Streckenschlüsse wird so gestaltet, dass das Risiko ihres vorzeitigen Versagens gering gehalten wird.

Gaseindringdruck, Permeabilität: Die Eigenschaften der Streckenverschlüsse bestimmen den Gaseindringdruck und die integrale Permeabilität.

Auflockerungszone: Der Stützdruck durch den Streckenverschluss kann zum Verschließen der Risse in der Auflockerungszone führen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Außerdem kann der Stützdruck des Streckenverschlusses zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge führen.

Bemerkungen:

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die thermische Expansion oder Kontraktion wirkt indirekt über die Verschlussmaterialien.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Permeabilität

Kanalisation in Dichtelementen

Gaseindringdruck

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Das Auftreten einer möglichen Alteration der Verschlüsse wird durch die Eigenschaften der Streckenverschlüsse beeinflusst.

Konvergenz: Die Streckenverschlüsse bauen einen Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt.

Nicht thermisch induzierter Volumenänderungen von Materialien: Das Auftreten nicht thermisch induzierter Volumenänderungen von Materialien (Betonquellen) hängt von den Eigenschaften der Streckenverschlüsse ab.

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses, Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Die Streckenverschlüsse werden so ausgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen Versagens und einer starken Lageverschiebung gering ist.

Permeabilität, Gaseindringdruck: Die Eigenschaften der Streckenverschlüsse bestimmen die integrale Permeabilität und den Gaseindringdruck.

Kanalisation in Dichtelementen: Das Auftreten von Kanalisierungen in Dichtelementen wird durch die Eigenschaften der Streckenverschlüsse beeinflusst.

Auflockerungszone: Durch den Stützdruck der Streckenverschlüsse können sich die Risse in der Auflockerungszone schließen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Der Streckenverschluss erzeugt einen Stützdruck, der zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge führt.

Bemerkungen:

Thermische Expansion und Kontraktion: das genannte FEP wirkt indirekt über das Verschlussmaterial.

39.11 Offene Fragen

- Eigenschaften und Entwicklung der Kontaktzone
- Design der Streckenverschlüsse (Optimierung)
- Qualifizierung der Nachweiswerkzeuge

39.12 Literaturquellen

Aland, H.J., Handke, N., Leuschner, J., Bodenstein, j., Maelzer, K., Gruner, M., Sitz, P., Spriner, H. (1999): Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluss aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen. - Kali u. Steinsalz 12 (1999), Nr. 9: 24-29.

BMBF (2006): „Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“. - Verbundvorhaben Stoff- gesetzvergleich, einzelne Teilberichte mit den Förderkennzeichen 02C1004 bis 02C1054.

Bollingerfehr, W., Engelhardt, H.J., Amelung, P., Müller-Hoeppe, N., Polster, M., Lerch, C. (2006): Abdichtung von Wegsamkeiten in Salzformationen mit kristallisierenden Evaporitmineralien (AISKRISTALL). Band 1. - Forschungsvorhaben, FKZ 02S8112, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Engelhardt, H.J., Kreienmeyer, M., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Köster, R., Eilers, G., Preuss, J. (2003). A constitutive law of salt concrete used for closure of an ULW-repository. Icem03-4570. Proc. ICEM03. 9th Internat. Conf. on radioact. Waste Management and Evironmental Remediation. Sept. 21-25, 2003; Oxford (UK).

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, AP 9.1.2, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Fischle, W., Schwieger, K. (1987): Untersuchungen an einem Abschlussbauwerk im Kalisalzbergwerk Hope. - Kali u. Steinsalz, 9 (1987), Heft 11; Kassel.

Gläss; F., Mauke, R., Eilers, G., Preuss, J., Schmidt, H., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N. (2005): Investigation on a salt concrete seal in the Asse salt mine. - WM05 Conference, 27.02.-03.03.2005; Tucson (Arizona).

Herbert, H.J., Hertes, U., Meyer, L., Hellwald, K., Dittrich, J. (2011): SVV2: Qualifizierung von Strömungsbarrieren in Salzformationen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS 263, ISBN 978-3-939355-40-3; Köln.

Knoll, P., Finder, M., Kudla, W. (2010): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leicht löslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV. Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. Zusammenfassender Abschlussbericht. Forschungsvorhaben FKZ 02C1204; Teutschenthal.

Lohmann, N. (1930): Die Anwendung des chemischen Verfestigungsverfahrens bei der Abdichtung eines Laugendammes und bei Schachtabdichtungsarbeiten auf dem Kaliwerk sachsen-weimar in Unterbreizbach (Rhön). - Kali und verwandte Salze, Ztschr. f. Kali-und Steinsalzind. sowie salinenwes., Deutscher Kaliverein.

Meyer, T., Teichmann, L., Heydorn, M. (2008): Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Tagung "Messen in der Geotechnik", 23.-24.10. 2008.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N. (2011a): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N. (2011b): Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse - Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und A). Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, K., Xie, M. (2012a): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wiczorek, K., Wolf, J. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren –Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Jobmann, M., Polster, M., Schmidt, H. (2007): The role of structural reliability of geotechnical barriers of an HLW / SF repository in salt rock within the safety case. OECD / NEA Symposium on "Safety cases for deep disposal of radioactive waste - where do we stand?", 23.-25.01.2007; Paris.

Sitz, P., Koch, G. (1999): Langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar. Untertägige Entsorgung - 4. Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Wiss. Ber. FZK-PTE Nr. 6, S. 169-207; Karlsruhe.

Sitz, P. (2003): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar. Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen . - Abschlussbericht zum BMBF-geförderten Vorhaben 02C05472 und 02C0902.

Wagner, K. (2005): Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge. - Dissertation TU Bergakademie Freiberg.

40 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.04)

40.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen beschreibt die Beeinflussung der mineralischen Baustoffe der Barrieren durch (geo-)chemische Umgebungsbedingungen über die Zeit.

40.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Strecken- und Schachtverschlüsse haben bei einer Endlagerung im Salz die Aufgabe, Lösungen vom Einlagerungsbereich fernzuhalten bzw. eine Ausbreitung kontaminierter Lösungen und Gase aus den Einlagerungsbereichen zu erschweren, bis der in die Grubenräume eingebrachte Salzgrus soweit kompaktiert ist, dass der Versatz ähnliche hydraulische Eigenschaften aufweist wie das umgebende Salzgebirge. Durch eine entsprechende Materialauswahl sowie konstruktive Maßnahmen wird sichergestellt, dass eine Alteration während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht zum teilweisen oder vollständigen Verlust der Barrierenintegrität führen kann.

Für spätere Zeiten nimmt die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen der Strecken- und Schachtverschlüsse infolge einer Alteration des Abdichtungsmaterials zu, doch ist dies dann nicht mehr sicherheitsrelevant, da zu dieser Zeit der Salzgrusversatz den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet. Außerdem wird dann ein erheblicher Teil der kurzlebigen Radionuklide bereits zerfallen sein.

Damit die Strecken- und Schachtverschlüsse ihre Funktion über die vorgesehene Funktionsdauer und darüber hinaus bewahren können, bestehen an die Barrieren folgende Anforderungen:

- ausreichend geringe Durchlässigkeit von Dichtelementen in Strecken- und Schachtverschlüssen,
- Langzeitbeständigkeit der Materialien und der Konstruktion, damit die definierten Barriereneigenschaften über die geplante Nutzungsdauer erhalten bleiben.

- Beständigkeit gegen saline Wässer aus Einschlüssen des Wirtsgesteins und gegen zutretende Lösungen aus dem Deckgebirge,
- ausreichende Quellfähigkeit des Bentonits unter den vorherrschenden Endlagerbedingungen,

Prozesse, die die Eigenschaften der Verschlussmaterialien negativ beeinflussen, können zu einem teilweisen oder sogar vollständigen Verlust der Barrierenfunktion führen. Darüber hinaus können aber auch Lageänderungen durch mechanische Einwirkungen wie Gebirgsdruck und daraus resultierende Spannungsumlagerungen sowie erhöhter Fluiddruck zu Lageänderungen der Strecken- und Schachtverschlüsse führen, so dass lokal Abrisse und Umläufigkeiten entstehen. Diese Sachverhalte werden in den FEP Fluiddruck, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Versagen eines Strecken- und Schachtverschlusses, Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren und Lageverschiebung des Schachtverschlusses berücksichtigt und weiter diskutiert.

40.3 Sachlage am Standort

Das Endlagerkonzept sieht die Errichtung von Streckenverschlüssen im schachtnahen Bereich (870-m-Sohle vier Streckenverschlüsse, 840-m-Erkundungssohle zwei Streckenverschlüsse) vor (Bollingerfehr et al. 2011, Bollingerfehr et al. 2012). Außerdem sind die Schächte durch Schachtverschlüsse abzudichten.

Diese Verschlüsse sollen in der Nachverschlussphase bis zum Abschluss der Salzgruskompektion die Einhaltung der radiologischen Schutzziele gewährleisten. Maßstab für die erforderliche Funktionsdauer der Barrieren ist die Dauer der Salzgruskompektion (Mönig et al. 2012). Nach ersten vorläufigen Modellrechnungen wird abgeschätzt, dass die Salzgruskompektion nach etwa 1.000 Jahren abgeschlossen sein wird. Die wesentlich längere Funktionsdauer der Strecken- und Schachtverschlüsse (50.000 Jahre) wird durch Integritätsnachweise belegt und deckt noch vorhandene Ungewissheiten bei der Prognose der Salzgruskompektion ab.

Wichtig ist, dass die Barrieren frühzeitig mit Beginn der Nachverschlussphase ihre Dichtfunktion erfüllen. Daher sind die heutigen Randbedingungen (Geologie/ Hydrogeologie) für die Auslegung bestimmend. So wurde bei der Auslegung der Schachtverschlüsse – entsprechend der heutigen Situation – eine Bandbreite von Süß- bis Salz-

wässern zugrunde gelegt und diversitäre Baustoffe für die Dichtelemente (Bentonit, Salzbeton, Sorelbeton) festgelegt (Engelhardt et al. 2011, Linkamp & Müller-Hoeppe 2012, Müller-Hoeppe et al. 2012). Wesentliche Änderungen dieser Rahmenbedingungen sind bis zur nächsten Kaltzeit nicht zu erwarten, so dass durch diese Auslegung alle möglichen Entwicklungen in diesem Zeitraum abgedeckt sind. Die im Grubengebäude angeordneten Streckenverschlüsse werden demgegenüber nur mit salinaren Lösungen in Kontakt kommen. Auch Lösungen, die über die Schächte in die Infrastrukturbereiche zutreten, werden sich durch Anlösung des Gebirges und durch in den Schotter eingebrachten Bischoffit aufsättigen (Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011, Müller-Hoeppe et al. 2012). Da die Entwicklung des zukünftigen Lösungsschemismus nur näherungsweise abgeschätzt werden kann, ist eine begrenzte Korrosion der Verschlüsse nicht auszuschließen. Die Barrieren sind aber so dimensioniert, dass sie bei einer derartigen Alteration ihre Dichtfunktion behalten.

40.4 Standortspezifische Auswirkungen

Da die Verschlussbauwerke frühzeitig mit Beginn der Nachverschlussphase ihre Dichtfunktion erfüllen sollen, sind sie entsprechend dem aktuellen Chemismus der auftretenden Wässer ausgelegt. Wesentliche Änderungen der Hydrogeologie und Hydrochemie sind im Zeitraum bis zur nächsten Kaltzeit nicht zu erwarten, so dass die Auslegung für die vorgesehene Funktionsdauer abdeckend ist. Die entsprechenden Nachweise der Barrierenstabilität werden durch die Integritätsanalysen geführt.

Da die hydrochemischen Verhältnisse in den Lösungen leichten Schwankungen unterliegen können, ist eine begrenzte Korrosion der Baustoffe nicht auszuschließen. Dies wird bei der Barrierenauslegung durch eine entsprechende Dimensionierung (Opferschichten) berücksichtigt. Daher wird die Funktion der Barrieren dadurch nicht beeinträchtigt.

Eine verstärkte Alteration der Barrieren kann nur auftreten, falls es durch weniger wahrscheinliche Entwicklungen der Geo- und Biosphäre zu Veränderungen des Grundwasserchemismus kommt, die von der prognostizierten und bei der Barrierenauslegung berücksichtigten Entwicklung signifikant abweichen. Durch eine derartige Alteration können die Abdichtungseigenschaften bzw. der Rückhaltewirkung der Strecken- und Schachtverschlüsse verändert werden, was einerseits das Vordringen von

Lösungen zu den Abfällen beeinflussen und beschleunigen kann sowie andererseits eine Auspressung kontaminierter Lösungen ermöglichen kann.

Weiterhin kann die Rückhaltewirkung der Barrieren gegenüber Radionukliden zusätzlich beeinflusst werden, wenn sich je nach pH/Eh-Bedingungen chemische Umwandlungsprodukte des Baumaterials oder das Baumaterial selbst auf die Radionuklid- ausbreitung auswirken (Sorption, Desorption).

40.5 Zeitliche Beschränkung

Für das FEP gibt es keine zeitlichen Beschränkungen. Zeitpunkte für mögliche Änderungen des geochemischen Milieus, die zu einer Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse führen können, können nicht angegeben werden.

40.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

40.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

40.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse

40.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeiten: Der obere Teil der Schachtverschlüsse steht in direktem Kontakt mit den Grundwässern des Deckgebirges, so dass eine Alteration bei einer Änderung des geochemischen Milieus wahrscheinlich ist. Bei einem Lösungszutritt zum Grubengebäude mit Änderung des geochemischen Milieus kann auch eine Alteration der Streckenverschlüsse auftreten.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Eine Alteration der Verschlüsse führt zu einer direkten Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist im Teilsystem "Strecken und Schächte" zu berücksichtigen.

40.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Kanalisation in Dichtelementen

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Auflockerungszone

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Advektion

Diffusion

Begründungen:

Verschlußmaterial: Die Verschlußmaterialien bestimmen die chemische Stabilität und damit auch die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse: Von den Eigenschaften der Strecken- und Schachtverschlüssen hängt es ab, ob und wann es zur Alteration der Verschlüsse kommen kann.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Falls es infolge nicht thermisch induzierter Volumenänderungen von Materialien (Quellen) zur Entstehung neuer Wegsamkeiten kommt, so kann dieser Prozess die Alteration der Barrieren beeinflussen.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses, Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses, Lageverschiebung eines Schachtverschlusses, Kanalisierung in Dichtelementen: Die genannten Ereignisse sind alle mit einer erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit der Barriere verbunden und können daher ebenfalls einer Alteration der Verschlüsse Vorschub leisten.

Geochemisches Milieu: Voraussetzung für das Auftreten einer Alteration der Verschlüsse ist ein geochemisches Milieu, das von den chemischen Verhältnissen abweicht, die bei der Auswahl der Verschlußmaterialien und der Auslegung der Barrieren unterstellt wurden.

Auflösung und Ausfällung: Die Auflösung und Ausfällung von Stoffen im Porenraum des Verschlußmaterials beeinflusst den Ablauf der Alteration.

Korrosion von Materialien mit Zement- und Sorelphasen: Diese Korrosion trägt wesentlich zur Alteration der Verschlüsse bei.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge beeinflussen die Alteration der oberen Teile der Schachtverschlüsse.

Auflockerungszone, Advektion, Diffusion: Der Stofftransport durch die Barriere erfolgt über Diffusion, der Stofftransport am Kontakt Barriere - Gebirge durch die Auflocke-

rungszone je nach Verhältnissen diffusiv oder advektiv. Diese Stofftransportprozesse können auch zur Alteration beitragen.

Bemerkungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Ein Zutritt von Lösungen ins Grubengebäude kann indirekt über eine Änderung des geochemischen Milieus und durch Auflösung und Ausfällung zu einer Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen führen.

Zersetzung von Organika: Eine Zersetzung von Organika ist für die Alteration nicht relevant, da die vorgesehenen Verschlussbauwerke keine organische Dichtmaterialien (Asphalt, Bitumen) enthalten.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Porosität

Permeabilität

Kanalisation in Dichtelementen

Quellen des Bentonits

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Gaseindringdruck

Auflockerungszone

Kolloide

Begründungen:

Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse: Durch die Alteration ändert sich das Verschlussmaterial und die Funktion von Strecken- und Schachtverschlüssen wird beeinträchtigt.

Konvergenz, Auflockerungszone: Außerdem kann durch die Alteration die mechanische Stabilität der Barriere beeinträchtigt werden. Wenn die Stützwirkung der Barriere auf das Gebirge nachlässt, hat dies Auswirkungen auf die Konvergenz und die Auflockerungszone.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses, Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: Eine intensive Alteration der Verschlüsse kann langfristig zu deren Versagen führen.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Quellen des Bentonits, Porosität, Permeabilität, Gaseindringdruck: Änderungen des Stoffbestandes durch Alteration wirken sich auf materialspezifische Eigenschaften, wie die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen (Quellen), die Porosität, die Permeabilität und den Gaseindringdruck aus.

Kanalisation in Dichtelementen: Eine lokale Alteration der Barrieren kann zu einer Kanalisation in Dichtelementen führen.

Geochemisches Milieu im Grubenbau, Kolloide: Das Herauslösen bestimmter Bestandteile des Baumaterials kann auch das geochemische Milieu im Grubenbau beeinflussen und darüber hinaus zur Kolloidbildung beitragen.

40.11 Offene Fragen

Langzeitstabilität verschiedener Verschlussmaterialien im salinaren Milieu (Bentonit, Asphalt, Bitumen etc.)

40.12 Literaturquellen

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

IfG Leipzig (1998-2000): Standsicherheitsnachweis für das statische Widerlager im Streckenverschlussbauwerk in der EU1 der Grube Sondershausen. - Institut für Gebirgsmechanik; Leipzig.

Kali & Salz (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. - BMBF-Forschungsvorhaben 02C0516, Kali +Salz AG; Kassel.

Kreienmeyer, M., Lerch, C., Polster, M., Tholen, M. (2008): Abschlussbericht „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“. Aufgabenpaket AP 5 Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. - DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-20-2008-AP; Peine.

Linkamp, M., Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J. (2012): Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgsässer. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Mauke, R., Schmidt, H. (2003): Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse. - BfS/DBE, Vortrag beim 32. Geomechanik-Kolloquium; Leipzig.

Meyer, T., Teichmann, L., Heydorn, M. (2008): Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Tagung "Messen in der Geotechnik", 23.-24.10. 2008.

Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. - GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2003): Repository Seal Requirements and Design. - EBS-Design Requirements and Constraints. Workshop; Turku, Finland.

Sitz, P. (2001): Langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar. - 5. Statusgespräch zu FuE Vorhaben; Leipzig.

Sitz, P. (2003): Forschungsvorhaben: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Verschlussbauwerke für UTD im Salinar. Bau und Test eines Verschlussbauwerks unter realen Bedingungen. - TU-BAF.

41 Sonstige Verschlussbauwerke (2.1.05.05)

41.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt das Design sowie die physikalischen und hydraulischen Eigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke. Es handelt sich um Dichtpfropfen an der Einmündung der Zugangsstrecken der Einlagerungsfelder in die Richtstrecken sowie um die Verschlusspfropfen vertikaler Einlagerungsbohrlöcher.

41.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Als "Sonstige Verschlussbauwerke" werden hier geotechnische Barrieren bezeichnet, die keine primäre Einschlussfunktion haben und daher nicht unmittelbar zum sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle beitragen. Die "Sonstigen Verschlussbauwerke" haben komplementäre Funktionen in der betrieblichen Phase (Strahlenschutzfunktion, Abtrennung abgeworfener Feldesteile, Stabilisierung von Grubenräumen) oder unterstützen in der Nachverschlussphase andere Barrieren in ihren Funktionen bzw. beeinflussen das geochemische Milieu in positiver Weise (z. B. Mg-Depot).

Beispiele für derartige Verschlussbauwerke sind die Betonpfropfen, die in den Zugangsstrecken zu den Einlagerungskammern für die radioaktiven Abfälle der WIPP vorgesehen sind (EPA 2009, Hansen 2009). Diese Pfropfen dienen dort dem Explosionsschutz. Bezüglich einer Rückhaltung mobilisierter Radionuklide wird von ihnen kein Kredit genommen.

Das Schließungskonzept für das Endlager Morsleben sowie die Notfallmaßnahmen für das Bergwerk Asse sehen "Stützenden Versatz" aus Salzbeton bzw. Sorelbeton zur mechanischen Stabilisierung von Grubenräumen vor. Es bestehen weder Dichtheitsanforderungen noch Anforderungen an die Funktionsdauer (Müller-Hoeppe et al. 2002, BfS 2010).

Das Konzept der Nagra für die Endlagerung in Tonstein sieht einen Verschluss der ILW-Einlagerungskammern mit Betonpfropfen vor, die ein langsames Entweichen des Gases aus den Einlagerungskammern ermöglichen und dabei auch ein zusätzliches Speichervolumen für Gas darstellen (Nagra 2009) .

41.3 Sachlage am Standort

Zu den sonstigen Verschlussbauwerken gehören die Dichtpfropfen an der Einmündung der Zugangsstrecken der Einlagerungsfelder in die Richtstrecken sowie die Verschlusspfropfen vertikaler Bohrlöcher, nicht aber die Strecken- und Schachtverschlüsse.

1. Dichtpfropfen:

Das Verschlusskonzept für ein mögliches Endlager am Standort Gorleben sieht für alle Endlagervarianten neben der Errichtung von Schacht- und Streckenverschlüssen eine Verfüllung der Richtstrecken mit feuchtem Salzgrus und der Einlagerungsfelder mit trockenem Salzgrus vor (Müller-Hoeppe et al. 2012). Da zum Zeitpunkt der Erstellung des FEP-Katalogs nicht abschließend geklärt war, ob eine Migration von Lösungen aus dem feuchten Salzgrus in die trockenen Einlagerungsfelder auftreten kann, werden trockener und feuchter Salzgrus durch Dichtpfropfen getrennt, die an den Einmündungen der Zugangsstrecken zu den Einlagerungsfeldern errichtet werden. Außerdem puffern die aus Sorelbeton bestehenden Dichtpfropfen das geochemische Milieu in den Einlagerungsbereichen und können die RN-Mobilisierung begrenzen. Während der Betriebsphase trennen die Dichtpfropfen bereits verfüllte und abgeworfene Einlagerungsbereiche vom restlichen Grubengebäude.

Das kombinierte Endlagerkonzept A bzw. B1 sieht 12 Einlagerungsfelder für wärmeentwickelnde Abfälle in POLLUX- bzw. CASTOR-Behältern und drei Einlagerungsfelder für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle vor (Bollingerfehr et al. 2011, Bollingerfehr et al. 2012). Da jeweils die Zugangsstrecke (Querschlag) zu den Einlagerungsfeldern an beiden Enden (Felder für wärmeentwickelnde Abfälle) bzw. der Zugang jeder Einlagerungskammer (vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle) verschlossen wird, werden insgesamt 34 Dichtpfropfen zu errichten sein.

Bei den Endlagerkonzepten B2 und C ist jeweils die Zugangsstrecke zu den Einlagerungsbohrlöchern an beiden Enden durch Dichtpfropfen zu verschließen. Dadurch ergeben sich für das Endlagerkonzept C (Bollingerfehr et al. 2012) mit 19 Zugangsstrecken 38 Dichtpfropfen.

Die Entwicklung des Designs der Dichtpfropfen ist noch nicht abgeschlossen. Das aktuelle Konzept sieht folgende Merkmale vor:

Die Dichtpfropfen sind ca. 10 m lange Betonkörper. Das Baumaterial ist dasselbe Material, das auch für die Errichtung der Streckenverschlüsse verwendet wird. Es handelt sich um Sorelbeton A1, der aus Magnesiumoxid (MgO) als Bindemittel (11,3 %), Steinsalzgrus als Zuschlagstoff (63,7 %) und Magnesiumchlorid (MgCl₂)-Lösung (25 %) besteht. Dieses Baumaterial ist mit dem erwarteten geochemischen Milieu kompatibel. Der entsprechende Nachweis der Langzeitstabilität ist noch zu führen. Die möglichen Auswirkungen einer thermochemischen Sulfatreduktion auf die Barrierenbaustoffe müssen noch durch Modellrechnungen analysiert werden.

Falls sich aus hydraulischen Modellrechnungen entsprechende Hinweise ergeben, wird das Dichtelement noch um eine vorgeschaltete Schotterkammer ergänzt, um einen Lösungsaustausch zwischen trockenem und feuchtem Versatz aufgrund des hydraulischen Gradienten und adhäsiver Sogeffekte zu vermeiden.

Da die Dichtpfropfen in unmittelbarer Nähe zu den Einlagerungsfeldern errichtet werden, werden sie durch die wärmeentwickelnden Abfälle signifikant erwärmt. Die resultierenden thermomechanischen Spannungen werden bei der Auslegung berücksichtigt.

Im Unterschied zu den Streckenverschlüssen sind die Dichtpfropfen nicht redundant ausgelegt, sondern bestehen nur aus einem Betonelement.

Die Errichtung der Barrieren wird in ähnlicher Weise wie bei den Streckenverschlüssen qualitätsgesichert erfolgen. Außerdem wird die Auflockerungszone vor der Errichtung an der Einbauposition so weit wie möglich entfernt. Anforderungen an die Funktionsdauer bestehen nicht. Die Funktionsdauer wird sich aus den Randbedingungen, vor allem aus geochemischen Einwirkungen, ergeben und vermutlich mehrere 1.000 Jahre betragen (Xie & Herbert 2012a, Xie & Herbert b, Voigt 2008).

2. Bohrlochverschlusspfropfen für vertikale Einlagerungsbohrlöcher:

Aus betrieblichen Gründen (sukzessives Abwerfen verfüllter Bohrlöcher, während der Einlagerungsbetrieb in den anderen Bohrlöchern fortgeführt wird) ist es erforderlich, den Bohrlochkeller oberhalb der verschlossenen Verrohrung der vertikalen Einlagerungsbohrlöcher (Konzept C) mit Sorelbeton zu vergießen. Das vorgesehene Baumaterial entspricht dem Sorelbeton A1 (Beschreibung siehe oben). Anforderungen an die Dichtheit oder eine Funktionsdauer bestehen nicht, es handelt sich um eine reine betriebliche Strahlenschutzmaßnahme.

41.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Dichtpfropfen sind Elemente des Endlagerverschlusskonzeptes, die einen Lösungszutritt aus dem feuchtem Salzgrusversatz zu den Einlagerungsfeldern begrenzen sollen. Zudem puffert der Sorelbeton in den Dichtpfropfen und den Bohrlochverschlusspfropfen das geochemische Milieu und kann die Radionuklidmobilisierung begrenzen.

41.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

41.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

41.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

41.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

41.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Dichtpfropfen und Bohrlochverschlusspfropfen sind Teil des Endlagerverschlusskonzeptes. Gelingen und damit Randbedingungen für den Sicherheitsnachweis.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Aus dem FEP ergibt sich keine direkte Beeinträchtigung der Funktion einer Initial-Barriere

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist in den Teilsystemen "Nahfeld" (Bohrlochpfropfen) und "Strecken und Schächte" (Dichtpfropfen) zu berücksichtigen.

41.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben

Diapirismus

Verschlussmaterial

Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Fluiddruck

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Ausfall eines Dichtpfropfens

Kanalisation in Dichtelementen

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Thermische Expansion oder Kontraktion

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Erdbeben, Diapirismus: Diese Prozesse können zu Verschiebungen im Grubengebäude und in der Folge zu mechanischen Lasten auf die sonstigen Verschlussbauwerke führen.

Verschlussmaterial: Die in den Verschlussbauwerken verwendeten Materialien beeinflussen die Eigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke.

Bohrlochverrohrung: Beeinträchtigungen der Bohrlochverrohrung (z. B. durch thermo-mechanische Deformation) können sich auf die Bohrlochpfropfen auswirken.

Konvergenz: Durch die Konvergenz des Gebirges werden die sonstigen Verschlussbauwerke eingespannt.

Fluiddruck: Aus dem Fluiddruck ergibt sich eine hydraulische Last, die auf die sonstigen Verschlussbauwerke wirkt und bei der Auslegung berücksichtigt wird.

Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien: Diese Prozesse beeinflussen die Eigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: beeinflusst die Eigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke.

Ausfall eines Dichtpfropfens: Der Ausfall eines Dichtpfropfens verändert dessen Eigenschaften.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Eine zusätzliche mechanische Last auf die sonstigen Verschlussbauwerke kann aus der thermischen Expansion und Kontraktion des Gebirges durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle resultieren.

Auflockerungszone: Die Auflockerungszone bestimmt maßgeblich die hydraulischen Eigenschaften der Barriere.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Spannungsverhältnisse im Gebirge wirken unmittelbar auf die sonstigen Verschlussbauwerke.

Thermochemische Sulfatreduktion: Die thermochemische Sulfatreduktion kann zur Alteration sulfatischer Baustoffbestandteile (Anhydrit im Salzgrus) führen und durch die Volumenzunahme die mechanischen Eigenschaften der Dichtpfropfen verändern.

Bemerkungen:

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Die Korrosion der Materialien wirkt indirekt über die Eigenschaften der Verschlussmaterialien auf die sonstigen Verschlussbauwerke.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Versagen eines Dichtpfropfens

Permeabilität

Kanalisation in Dichtelementen

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Gaseindringdruck

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Konvergenz: Die sonstigen Verschlussbauwerke bauen einen Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien: Das Auftreten nicht thermisch induzierter Volumenänderungen von Materialien (Betonquellen) hängt von den Materialeigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke ab.

Permeabilität, Gaseindringdruck: Die Eigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke bestimmen die integrale Permeabilität und den Gaseindringdruck.

Versagen eines Dichtpfropfens, Kanalisierungen in Dichtelementen: Ein Versagen eines Dichtpfropfens oder das Auftreten von Kanalisierungen in Dichtelementen werden durch die Eigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke beeinflusst.

Bohrlochverrohrung: Veränderungen der Bohrlochverschlusspfropfen (z. B. Korrosion) können sich auf die Bohrlochverrohrung auswirken.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Das Auftreten einer Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen hängt von den Eigenschaften der sonstigen Verschlussbauwerke ab.

Auflockerungszone: Durch den Stützdruck der sonstigen Verschlussbauwerke können sich die Risse in der Auflockerungszone schließen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die sonstigen Verschlussbauwerke erzeugen einen Stützdruck, der zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge führt.

Bemerkungen:

Thermische Expansion oder Kontraktion: Dieses FEP wird indirekt über das Verschlussmaterial beeinflusst.

Geochemisches Milieu: Indirekt über Korrosion und Verschlussmaterial

41.11 Offene Fragen

- Auswirkungen der thermochemischen Sulfatreduktion
- Prozessverständnis: Lösung im Salzgrus
- Sorelbeton: Dichteigenschaften und Fluidtransport
- Anpassung des Designs der Dichtpfropfen

41.12 Literaturquellen

BfS (2010): Optionenvergleich Asse: Fachliche Bewertung der Stilllegungsoptionen für die Schachanlage Asse II. Herausgeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS); Salzgit-ter.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

EPA (2009): Compliance Recertification Application (CRA-2009) Compliance Application Review Document (CARD) No. 44 Engineered Barriers. U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

Hansen, F. (2009): Assessing Engineered Systems in Geologic Repositories: WIPP." Performance Assessment Community of Practice Workshop, July 13-14. Salt Lake City, Utah, USA: U.S. Department of Energy's National Nuclear Security Administration. Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2002): Closure Concept for the Morsleben LLW Repository for Radioactive Waste. Design of the Drift Seals in a former Salt Mine. - Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case. Workshop Proceedings; Oxford, UK.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Nagra (2009). The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland. Nagra NTB 09-06, Wetingen, Switzerland: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra); Wetingen.

Voigt, W. (2008): Nachweisführung der chemischen und geochemischen Langzeitbeständigkeit für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton. Bericht, BfS -PSP-Element: 9M 223 101-61. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie; Freiberg.

Xie, Mingliang, Herbert, H.J. (2012a): Geochemical analysis of the sealing system. Bericht zum Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig.

Xie, M., Herbert, H.-J. (2012): Geochemical simulation for sored concrete protection by adding bischofite product. In: Geochemical analysis of the sealing system, Bericht zum Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben: Braunschweig.

42 Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften (2.1.06.01)

42.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als "Technische Einrichtungen" werden hier die Komponenten betrachtet, die während der Betriebsphase nicht zurückgebaut werden und im Grubengebäude verbleiben. Diese können für die Langzeitsicherheitsanalyse relevant sein.

42.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In Salzbergwerken ist der überwiegende Teil der Grubenbaue im Steinsalz während der Betriebsphase auch ohne Ausbau weitgehend standsicher. Trotzdem sind einige Bereiche mit großen Firstspannweiten, z. B. Schachtfüllörter, Streckenkreuze und Werkstätten, d. h. vor allem die Infrastrukturbereiche, durch geeignete Ausbaumaßnahmen zu sichern.

Ausbauelemente können sich innerhalb oder weitgehend außerhalb des lichten Querschnitts des betreffenden Grubenhohlraums befinden.

- Zu den innerhalb des lichten Querschnitts befindlichen Ausbauelementen zählen offene und geschlossene Ausbauarten.
- Offene Ausbauarten sind z. B. Türstockausbau und Portalausbau. Beide bestehen aus Stahlträgern, die möglichst dicht an der Kontur des Grubenhohlraums entlang gebaut sind und häufig zum Schutz von Mensch und Maschine vor herabfallenden Gesteinsstücken mit Maschendraht, seltener auch mit Verzugsblechen kombiniert werden.
- Zu den geschlossenen Ausbauarten zählen z. B. Spritzbetonausbau, Formstein- ausbau und Mauerwerksausbau. Spritzbeton enthält häufig Zusätze von Drahtstücken oder Kunststofffasern, um die Zugfestigkeit des Betons zu erhöhen.
- Zu den weitgehend außerhalb des lichten Querschnitts befindlichen Ausbauelementen zählt der Ankerausbau. Er besteht aus dem eigentlichen Anker im Ankerbohrloch und einer in den lichten Querschnitt hineinragenden Ankerplatte. Auch der Ankerausbau wird häufig zum Schutz von Mensch und Maschine vor herabfallenden Gesteinsstücken mit Maschendraht oder Kunststoffmatten kombiniert.

Möglicherweise im Endlager verbleibende sonstige technische Einrichtungen können z. B. Kabel und andere Versorgungsleitungen sowie Bauteile der Wetterführung sein. Diese sonstigen technischen Einrichtungen können unter anderem Metalle und Kunststoffe enthalten.

Für Geräte und Anlagen sind Betonfundamente zu errichten, die im Bergwerk verbleiben. Dasselbe gilt für Schienen oder Reste des Fahrbahnbaus.

42.3 Sachlage am Standort

Das geplante Endlagerbergwerk besteht aus der Erkundungssohle und der Einlagerungssohle mit dem eigentlichen Einlagerungsbereich und weiteren Grubenbauen für Infrastruktur und Wetterführung (Bollingerfehr et al. 2011). Alle Grubenräume werden am Ende der Betriebsphase mit Versatzstoffen (Salzgrus bzw. Schotter) versetzt.

Im Grubengebäude können sich nach dem Verschluss noch technische Einrichtungen und Bauwerke befinden, sofern sie den sicheren Einschluss der Abfälle nicht beeinträchtigen. Dazu gehören z. B.:

- Schienen (alle Endlagerkonzepte)
- Messeinrichtungen und elektrische Leitungen,
- Ausbauelemente zur Erhaltung der Standsicherheit oder zum Schutz von Mensch und Maschine vor herabfallenden Gesteinsstücken aus Firste und Stoß,
- Fundamente von ehemaligen technischen Geräten und Anlagen,
- Anker zum Befestigen von technischen Geräten und Anlagen an der Firste oder am Stoß,
- Reste vom Wege- und Fahrbahnbau.

Bei der Umsetzung des konkreten Planungskonzeptes des Endlagers ist festzulegen, welche technischen Einrichtungen im Grubengebäude verbleiben dürfen und welche beraubt werden müssen. Entsprechende Mengenermittlungen sind anhand des konkreten Endlagerkonzeptes durchzuführen.

Beim Rückbau des Endlagers erfolgt eine Abwägung zwischen dem Aufwand für die Rückholung technischer Einrichtungen und möglichen Auswirkungen. Falls erforderlich, wird ein Rückbau stattfinden.

42.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die im Endlager verbleibenden technischen Einrichtungen tragen direkt zu den Inventaren an Metallen, Organika und sonstigen Stoffen im Endlager bei und beeinflussen daher die Entwicklung des geochemischen Milieus sowie die Gasbildung durch Metallkorrosion bzw. mikrobielle Degradation.

Auch der Beton der Ausbauelemente wird korrodieren. Ausmaß und Geschwindigkeit hängen von der Qualität des Betons und den angreifenden Agenzien (z. B. verschiedene Salzlösungen) ab. Im Zuge der Betonkorrosion entstehen zunächst Anhydrit und Mg-Oxychlorid, dann Brucit und schließlich verschiedene feste

Calciumchloridhydrat-Phasen (Kienzler & Vejmelka 1998). Die Entwicklung der pH-Werte hängt davon ab, ob eine Durchströmung des Zementes oder ein geschlossenes, stagnierendes System vorliegt.

42.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

42.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

42.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

42.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

42.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Die technischen Einrichtungen und deren Eigenschaften sind Teil des Endlagerkonzeptes und stellen daher eine Randbedingung für den Sicherheitsnachweis dar.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Da während der Schließung des Endlagers alle Einbauten, Kabel etc. im Bereich der Barrieren zurückgebaut werden, beeinträchtigen die Technischen Einrichtungen nicht die Funktion der Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist in den Teilsystemen "Nahfeld" sowie "Strecken und Schächte" zu berücksichtigen, da die Einrichtungen Teile dieser Teilsysteme sind.

42.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Diapirismus

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Konvergenz

Salzgruskompaktion

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Zersetzung von Organika

Thermische Expansion oder Kontraktion

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Diapirismus: Technische Einrichtungen, wie z. B. Streckeneinbauten oder Schienen, können durch den Diapirismus deformiert und ihre Lage geändert werden.

Inventare: Metalle, Organika, Sonstige Stoffe: Die Eigenschaften der bei der Herstellung verwendeten Stoffe beeinflussen die Eigenschaften der technischen Einrichtungen.

Metallkorrosion, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Zersetzung von Organika: Die Materialien der technischen Einrichtungen können durch die genannten Prozesse beeinflusst werden.

Salzgruskompaktion: Durch die Salzgruskompaktion wird die Gebirgsspannung auf die Einrichtungen übertragen.

Thermische Expansion und Kontraktion: Die thermische Expansion und Kontraktion der Materialien der Einrichtungen wirkt sich auf ihre Eigenschaften aus.

Konvergenz: Die Konvergenz führt zu Hebungen der Streckensohle und beeinflusst dadurch die Schienen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Versatz werden die Gebirgsspannungen auf die Einrichtungen übertragen.

Bemerkungen:

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Die Schienen in den Einlagerungsstrecken sind möglicherweise von einer Materialversprödung betroffen. Dies ist aber nicht relevant, da die Schienen während der Nachverschlussphase keinerlei Funktion haben.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Konvergenz

Salzgruskompaktion

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Thermische Expansion oder Kontraktion

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Sorption und Desorption

Begründungen:

Inventare: Metalle, Organika, Sonstige Stoffe: Durch die Materialien der technischen Einrichtungen werden die unterschiedlichen Stoffinventare im Endlager beeinflusst.

Konvergenz: Ein Streckenausbau kann die Konvergenz beeinflussen.

Salzgruskompaktion: Die Salzgruskompaktion wird durch einen Streckenausbau beeinflusst.

Metallkorrosion, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, thermische Expansion und Kontraktion: Die Intensität der Korrosion sowie die thermische Expansion und Kontraktion hängt von den Materialeigenschaften der Einrichtungen ab.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Von den mechanischen Eigenschaften der Einrichtungen (z. B. Streckenausbau) hängt der Stützdruck ab, der den Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge entgegenwirkt.

Sorption und Desorption: An der Oberfläche der technischen Einrichtungen können Stoffe sorbieren bzw. desorbieren.

42.11 Offene Fragen

Keine.

42.12 Literaturquellen

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Kienzler, B., Vejmelka, P. (1998): Geochemische Modellierung der Korrosion von zementierten Abfallprodukten in Salzlösungen. - Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6048; Karlsruhe.

43 Bohrlochverrohrung (2.1.06.02)

43.1 Definition/Kurzbeschreibung

Um bei einer Bohrlochlagerung hochradioaktiver Abfälle und ausgedienter Brennelemente die gesetzlich geforderte Möglichkeit zur Rückholung und Bergung der Endlagerbehälter während des Endlagerbetriebes und bis zu 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers zu gewährleisten, werden die Einlagerungsbohrlöcher verrohrt.

43.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Verrohrung von Großbohrlöchern ist der Stand im Bereich der Bohrtechnik und wird z. B. in der Petro-Industrie oder Geothermie angewendet.

Im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe sind verrohrte Einlagerungsbohrlöcher z. B. bei der Bohrlochlagerung im Ton vorgesehen (horizontale Bohrlöcher: ANDRA 2005, vertikale Bohrlöcher: Pöhler et al. 2008). Wie im vorliegenden Fall dient die Verrohrung dabei vor allem betrieblichen Zwecken.

43.3 Sachlage am Standort

Gemäß den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ (BMU 2010) müssen Brennelement-Behälter über 500 Jahre den sicheren Einschluss volatiler Radionuklide gewährleisten und außerdem müssen diese Behälter sowie die Behälter mit hoch radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase rückholbar und während der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase zu bergen sein. Um diese Anforderung zu erfüllen, sieht die Endlagervariante C eine Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher vor. Ziel dieser Verrohrung ist die mechanische Stabilisierung des Bohrlochs und dadurch der Erhalt der Integrität der Einlagerungsbehälter sowie die Erhaltung der Zugänglichkeit der Endlagerbehälter (Bollingerfehr et al. 2012).

Für die Einlagerungsbohrlöcher sind eine Länge von 300 m von der Einlagerungssohle (870 m) und ein Innendurchmesser der Verrohrung von 62 cm (für Leistungsreaktor-BE) und 84 cm (für Forschungsreaktor-BE) vorgesehen. Abweichungen des Bohrlochs von 0,1 % aus der Senkrechten sind für das Einbringen der Verrohrung nicht relevant

(Bollingerfehr et al. 2012). Der Außendurchmesser der Verrohrung wird 72 cm bzw. 94 cm betragen. Die Wandstärke von 5 cm wurde aus thermomechanischen Auslegungsrechnungen für den Werkstoff GGG40 (EN-GJS-400-15) abgeleitet. Dabei wurde auch eine Anisotropie der Gebirgsspannungen von 10 % berücksichtigt. Die Verrohrung soll in Abschnittslängen von 1,5 m eingebracht werden, wobei die einzelnen Abschnitte entweder verschraubt oder verschweißt werden. Außerdem wird die Verrohrung beidseitig durch Stahldeckel laugendicht verschlossen. Der Erhalt dieser Dichtheit stellt aber keine Anforderung an die Verrohrung dar. Der Ringraum zwischen Bohrloch und Verrohrung wird nicht verfüllt, sondern wird sich in ca. 1 bis 2 Jahren durch die Konvergenz schließen. Die Beladung der Einlagerungsbohrlöcher wird erst beginnen, wenn das Gebirge auf die Verrohrung aufgelaufen ist. Ein Einlagerungsbohrloch kann mit 50 Kokillen beladen werden. Der Ringspalt zwischen Kokille und Verrohrung soll mit einem Versatz aus Quarzsand verfüllt werden. Zudem soll zwischen den einzelnen Kokillen jeweils 0,75 m Versatz eingebracht werden und oberhalb der obersten Kokille eine 10 m mächtige Versatzschicht (wegen Abschirmung) eingefüllt werden. Anforderungen an den Versatz sind Lastabtrag und Ermöglichung der Stapelbarkeit der Kokillen, thermische Anbindung an die Verrohrung und das Gebirge sowie Rieselfähigkeit im Fall einer Rückholung/Bergung der Endlagerbehälter.

43.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das Konzept der Verrohrung inkl. Verfüllung hat Auswirkungen auf die Spannungsverhältnisse und den Wärmeeintrag in das Gebirge. Für die Langzeitsicherheit relevant ist, dass durch die Verfüllung der Verrohrung mit Quarzsand langfristig Bereiche mit hohen Porositäten geschaffen werden, die Speicherraum und potentielle Transportpfade für Fluide darstellen. Da an die Verrohrung keine Dichtheitsanforderungen bestehen, kann ein frühzeitiges Eindringen von Lösungen nicht ausgeschlossen werden. Dies hätte u. a. eine Korrosion der Endlagerbehälter zur Folge. Das Bohrlochkonzept, d. h. die Kombination aus Endlagerbehälter, Bohrlochverrohrung, Bohrlochstopfangrenzenden und Wirtsgestein, wird aber so ausgelegt, dass die Endlagerbehälter einer entsprechenden Korrosion über 500 Jahre widerstehen.

43.5 Zeitliche Beschränkung

Die Bohrlochverrohrung wird bezüglich ihrer mechanischen Integrität für eine Funktionsdauer von 500 Jahren ausgelegt. Zu späteren Zeiten kann ein sukzessiver Ausfall der Verrohrungen durch chemische und mechanische Einwirkungen unterstellt werden.

43.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

43.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

43.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

43.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Bohrlochverrohrungen sind Teil des Endlagerkonzeptes Variante C und stellen daher eine Randbedingung für den Sicherheitsnachweis dar.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die Bohrlochverrohrung stellt eine technische Einrichtung dar, die die Funktion der Initial-Barrieren nicht beeinträchtigt.

Wirkung in den Teilsystemen: Da sich die Bohrlochverrohrung im Nahfeld befindet, ist das FEP in dem entsprechenden Teilsystem zu berücksichtigen

43.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben

Diapirismus

Inventar: Metalle

Versatz

Sonstige Verschlussbauwerke

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Fluiddruck

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Wärmeproduktion

Thermische Expansion oder Kontraktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

Begründungen:

Erdbeben: Erdbeben können zu Spannungen in der Bohrlochverrohrung führen.

Diapirismus: Verschiebungen im Salz werden sich auf die Bohrlochverrohrungen auswirken.

Inventar: Metalle: Die verwendeten Materialien bestimmen die Eigenschaften der Bohrlochverrohrung.

Versatz: Der Innenraum der Verrohrung wird mit Quarzsand verfüllt.

Sonstige Verschlussbauwerke: Veränderungen der Bohrlochverschlusspfropfen (z. B. durch Korrosion) können sich auf die Bohrlochverrohrung auswirken.

Konvergenz: wirkt von außen auf die Bohrlochverrohrung

Fluiddruck: Über den äußeren Ringraum zwischen Bohrloch und Verrohrung sowie den Innenraum können Fluiddrucke auf die Verrohrung einwirken.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: die Sandverfüllung in der Verrohrung wird sich setzen.

Verlust der Integrität einer Bohrlochverrohrung: Hierdurch werden die Eigenschaften der Bohrlochverrohrung verändert.

Metallkorrosion: Bei Lösungszutritt wird die Verrohrung korrodieren.

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme, Strahlungsinduzierte Aktivierung: Nach Einlagerung der nicht abgeschirmten Behälter kommt es zur Einwirkung auf die Verrohrung. Durch Metallkorrosion wird Wasserstoff freigesetzt.

Wärmeproduktion: die Aufheizung durch die eingelagerten Behälter wirkt auf die Verrohrung ein.

Radiolyse: Die Radiolyse hat Einwirkung auf alle Materialien in der unmittelbaren Umgebung der Abfälle.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die thermische Expansion oder Kontraktion des Gebirges wirkt auf die Verrohrung ein.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Gebirgsspannungen stellen eine Lastannahme bei der Auslegung der Verrohrung dar.

Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern: Durch den Diapirismus kommt es zu einer Aufwärtsbewegung der Bohrlochverrohrungen, durch die hohe Dichte von Stahl im Vergleich zum Salz zu leichten Absenkungen.

Bemerkungen:

Kokillensticking: Aufgrund entsprechender Vorsorgemaßnahmen (Vertikalität des Bohrlochs, Kontrolle der Bohrlochverrohrung, Überwachung bei der Kokilleneinlagerung) ist ein Kokillensticking nicht zu betrachten.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Sonstige Stoffe

Sonstige Verschlussbauwerke

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Fluiddruck

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Thermische Expansion oder Kontraktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Sorption und Desorption

Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

Begründungen:

Inventare: Metalle, Sonstige Stoffe: Durch die eingebrachten Verrohrungen und deren Verfüllung ergeben sich Änderungen der Inventare.

Sonstige Verschlussbauwerke: Änderungen der Eigenschaften der Bohrlochverrohrung, z. B. durch Korrosion oder Deformation, können sich auf die Verschlusspfropfen auswirken.

Konvergenz: Die Bohrlochverrohrung baut einen Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt.

Fluiddruck: durch die Bohrlochverrohrung baut sich im Inneren ein Fluiddruck auf. Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Das Versagen hängt von den Eigenschaften der Bohrlochverrohrung ab.

Metallkorrosion: Die Metallkorrosion hängt vom Material der Bohrlochverrohrung ab. Radiolyse: Die Wandstärke der Bohrlochverrohrung hat Einfluss auf die Radiolyse z. B. des Wirtsgesteins

Materialversprödung, Aktivierung: Das für die Bohrlochverrohrung verwendete Material hat Einfluss auf eine mögliche Versprödung

Auflockerungszone: Durch den Stützdruck der Bohrlochverrohrung können sich Risse in der Auflockerungszone schließen.

Thermische Expansion und Kontraktion: Die Materialeigenschaften der Bohrlochverrohrung beeinflussen die thermische Expansion und Kontraktion.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Der Stützdruck durch die Bohrlochverrohrung führt zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge.

Sorption und Desorption: An der Oberfläche der Bohrlochverrohrung können Stoffe sorbieren bzw. desorbieren.

43.11 Offene Fragen

Nachweis der technischen Machbarkeit

43.12 Literaturquellen

ANDRA (2005): Dossier 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological repository; ANDRA, December 2005.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

ERATO. Abschlussbericht. - Förderkennzeichen 02E 10286, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC 28-2008-AB; Peine.Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H.J., Filbert, W., Tholen, M. (2008): Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein.

44 Ausfall einer Bohrlochverrohrung (2.1.06.03)

44.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Verlust der mechanischen Stabilität einer Bohrlochverrohrung durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen bzw. eine Kombination verschiedener Einwirkungen. Außerdem wird der Ausfall durch unerkannte Fertigungsfehler berücksichtigt.

44.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Keine.

44.3 Sachlage am Standort

Damit die Brennelement-Behälter gemäß den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ (BMU 2010) während der Betriebsphase zurückgeholt und über einen Zeitraum von 500 Jahren in der Nachverschlussphase geborgen werden können, sieht das Endlagerkonzept eine Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher vor. Die Bohrlochverrohrung ist gegen den Gebirgsdruck ausgelegt und hat eine mechanische Schutzfunktion für die eingelagerten, relativ dünnwandigen Brennstabkokillen. Daher kann ein späterer Ausfall der Bohrlochverrohrungen auch Auswirkungen auf die mechanische Stabilität der Brennelement-Behälter haben und die entsprechenden Entwicklungen werden im Folgenden betrachtet. Obwohl keine Anforderungen an die Dichtheit bestehen, ist ein laugendichter Einbau der Verrohrung vorgesehen.

Die Integrität der Bohrlochverrohrungen kann durch mechanische oder chemische Einwirkungen beeinträchtigt werden.

Entsprechende Einflussfaktoren könnten laterale Verschiebungen im Salz durch Diapirismus oder anisotrope Spannungsverteilungen im Gebirge z. B. durch die ungleichmäßige Aufheizung infolge der Einlagerung wärmeproduzierender Abfälle sein.

Zudem kann die mechanische Stabilität der Verrohrung durch Korrosionsprozesse oder strahlungsinduzierte Versprödungsprozesse verringert werden, so dass die Verrohrung dann auch bei geringeren Spannungen ausfallen kann.

Die Korrosion kann die Schweißnähte der Segmente der Verrohrung zerstören oder kurzfristig durch Lochfraßkorrosion bzw. langfristig durch Flächenkorrosion die Verrohrung beschädigen. In der Folge könnte Lösung eindringen. Da an die Verrohrung keine Dichtheitsanforderungen bestehen, ist nicht auszuschließen, dass bereits in der frühen Nachverschlussphase ohne Beschädigung der Verrohrung an den Verbindungsstellen der Verrohrungsabschnitte Lösungen in das Innere gelangen. Dann könnte die Metallkorrosion beidseitig die Verrohrung angreifen. Ein Prozess, der möglicherweise die Metallkorrosion noch intensiviert, ist die thermochemische Sulfatreduktion im angrenzenden Gebirge, durch die Sulfide freigesetzt werden.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Verrohrung ist der Fluiddruck, der vor allem infolge der Gasbildung durch Metallkorrosion stark ansteigen kann. Im Inneren der Verrohrung kann sich zudem nach Lösungszutritt Radiolysegas bilden.

Für die Endlagervariante C sind insgesamt 221 Einlagerungsbohrlöcher mit ca. 33.150 Verrohrungselementen (Segmenten) einzubringen. Die mechanische Auslegung der Verrohrung und die spätere Fertigung werden zur Gewährleistung der Standsicherheit nach den Anforderungen des EUROCODE erfolgen. Daher ist eine Versagensquote von 0,01 % zu unterstellen, so dass das mechanische Versagen von bis zu 6 Segmenten als wahrscheinlich und bis zu 8 Segmenten als weniger wahrscheinlich anzusehen ist.

44.4 Standortspezifische Auswirkungen

Bei einem Ausfall der Bohrlochverrohrung ist auch die Dichtheit nicht gegeben, so dass Lösungen in den Innenraum der Verrohrung gelangen können. Hier kann sich die Feuchtigkeit über die Sandverfüllung im ganzen Einlagerungsbohrloch verteilen und zur Korrosion der Endlagerbehälter führen.

Falls die Bohrlochverrohrung durch mechanische Einwirkung stark deformiert wird, kann dies auch zur Beschädigung der Endlagerbehälter im Inneren führen.

Falls aus den Endlagerbehältern Radionuklide freigesetzt werden, können sich diese über den Sandversatz im ganzen Bohrloch ausbreiten und dann durch die beschädigte Verrohrung in das Gebirge oder in das Grubengebäude freigesetzt werden.

44.5 Zeitliche Beschränkung

Die Bohrlochverrohrung wird für eine Funktionsdauer von 500 Jahren ausgelegt. Ein frühzeitiger Lösungszutritt ins Innere oder ein Versagen durch Fertigungsfehler sind aber auch zu dieser Zeit möglich. Zu späteren Zeiten kann das sukzessive Versagen der Verrohrungen durch chemische und mechanische Einwirkungen unterstellt werden.

44.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

44.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

44.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

44.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Da über 30.000 Verrohrungselemente in die Einlagerungsbohrlöcher einzubauen sind und für den Fertigungsprozess nach den Anforderungen des EUROCODE von einer Fehlerquote von 0,01 % auszugehen ist, werden möglicherweise 6 Verrohrungselemente mit Fertigungsfehlern eingebaut, die eventuell

vorzeitig versagen können. Darüber hinaus werden die Verrohrungen durch Korrosion langfristig ihre Integrität verlieren. Daher ist das FEP „wahrscheinlich“.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Keine. Die Bohrlochverrohrung hat eine mechanische Schutzfunktion für die eingelagerten Kokillen. Daher kann ihr Ausfall zu Spannungsumlagerungen im Verrohrungsinnenraum und in der Folge zu einem vorzeitigen Versagen der Brennelement-Behälter führen. Der Ausfall der Bohrlochverrohrung kann daher indirekt zu einem Versagen der Initial-Barriere "Brennelement-Behälter" führen.

Wirkung in den Teilsystemen: Da sich die Bohrlochverrohrung im Nahfeld befindet, ist das FEP in dem entsprechenden Teilsystem zu berücksichtigen

44.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Diapirismus

Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Fluiddruck

Metallkorrosion

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Diapirismus: Durch laterale Salzbewegungen kann es zu einer Beschädigung der Bohrlochverrohrungen kommen.

Konvergenz: falls der Gebirgsdruck den bei der Auslegung unterstellten Druck überschreitet, kann es zur Beschädigung der Bohrlochverrohrungen kommen.

Fluiddruck: falls der von außen einwirkende Fluiddruck oder ein Fluiddruck, der sich im inneren z. B. durch Gasbildung überschreitet, kann es zur Beschädigung der Bohrlochverrohrungen kommen.

Metallkorrosion: Bei Lösungszutritt wird die Verrohrung korrodieren. Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Durch Materialversprödung kann die Integrität der Bohrlochverrohrung beeinträchtigt werden.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Durch auslegungsüberschreitende Gebirgsspannungen kann die Integrität der Bohrlochverrohrungen beeinträchtigt werden.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versagen eines Brennelement-Behälters

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Fluiddruck

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Metallkorrosion

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter: Falls die Bohrlochverrohrungen deformiert werden, können auch im Inneren befindlichen Endlagerbehälter beschädigt werden.

Bohrlochverrohrung: Durch den Verlust der Integrität ändern sich die Eigenschaften der Bohrlochverrohrung.

Versagen eines Brennelement-Behälters, Versagen eines sonstigen Endlagerbehälters: Falls die Bohrlochverrohrung durch mechanische Einwirkung stark deformiert wird, können auch die Behälter im Inneren beschädigt werden.

Fluiddruck: Falls die Bohrlochverrohrung deformiert wird, ändert sich der Fluiddruck im Inneren.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Wenn die Bohrlochverrohrung beschädigt wird, können Lösungen in das Innere eindringen und hier durch die Sandverfüllung zirkulieren.

Konvergenz, Auflockerungszone, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Falls sich die mechanische Stabilität und somit der Stützdruck auf das Gebirge reduziert, können die Konvergenz oder die Auflockerung wieder einsetzen und Risse im Gebirge aufreißen. Außerdem ändern sich die Spannungsverhältnisse im Gebirge.

Bemerkungen:

Sorption und Desorption: Der Ausfall einer Bohrlochverrohrung beeinflusst nur indirekt über die Metallkorrosion die Sorption und Desorption.

44.11 Offene Fragen

- Ausfallwahrscheinlichkeit der Verrohrungselemente (Segmente)
- Bedeutung des Ausfalls einzelner Segmente für die Systementwicklung, insbesondere für den Behälterausfall

44.12 Literaturquellen

ANDRA (2005): Dossier 2005 Argile, Tome: Architecture and management of a geological repository; ANDRA, December 2005.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H.J., Filbert, W., Tholen, M. (2008): Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein. ERATO. Abschlussbericht. - Förderkennzeichen 02E 10286, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC 28-2008-AB; Peine.

45 Konvergenz (2.1.07.01)

45.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Konvergenz wird die Querschnittsverkleinerung von untertägigen Hohlräumen verstanden, die aufgrund von Spannungsumlagerungen nach der Auffahrung im umgebenden Gebirge einsetzt.

45.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Auf die an der Hohlraumkontur und im angrenzenden Salzgebirge wirkenden Spannungen reagiert das Gestein entsprechend seinen Materialeigenschaften mit mehr oder weniger großen Verformungen, die zeitabhängig unter Ausbildung von Schädigung (bei Belastungen oberhalb der Dilatanzgrenze) oder volumenkonstant erfolgen können. Dieser als Kriechen beschriebene visko-elasto-plastische Prozess tritt bereits bei kleinen Spannungsdifferenzen auf und ist neben dem Betrag des Spannungsdeviators von der Temperatur und der Ausbildung des Salzes (z. B. Verunreinigungen mit Auftreten von akzessorischen Sulfatmineralphasen) abhängig. Aufgrund der Kriechfähigkeit des Salinars werden Hohlräume im Wirtsgestein durch die Konvergenz geschlossen. Zur Modellierung der Konvergenz von Hohlräumen im Salinar sind von Bearbeitern verschiedener Institutionen unterschiedliche Stoffmodelle entwickelt worden, die über die klassischen Kriechansätze (z. B. BGRa, für eine Übersicht s. Hunsche & Schulze 1994) hinaus, auch die Modellierung zeit- und verformungsabhängiger Schädigungsprozesse erlauben. Der aktuelle Stand ist im Rahmen zweier aufeinander folgender BMBF-Verbundvorhaben (BMBF 2006 und 2010) unter der Beteiligung der in Deutschland kompetenten Kenntnisträger erarbeitet worden.

45.3 Sachlage am Standort

Mit der Auffahrung von Hohlräumen setzt als Folge der vorliegenden Gebirgsspannungen unmittelbar Konvergenz ein, die zu einer Verringerung des Hohlraumvolumens führt. Im Rahmen des untertägigen geotechnischen Messprogramms am Standort sind u. a. Inklinometer-, Konvergenz- und Extensometer- sowie Fissurometermesstellen zur Bestimmung der lokalen Gebirgsdeformation in unterschiedlichen Messebenen in den beiden Schächten, dem Infrastrukturbereich und dem EB1 eingerichtet worden (Bräuer

et al. 2011). Die seit Mitte der 90iger Jahren durchgeführten Messungen zeigen lokal teufen- und richtungsabhängig erhebliche Unterschiede.

Beispielsweise variieren die absolut für den Zeitraum 1995 bis 2006 gemessenen Konvergenzbeträge in Schacht 1 im Messquerschnitt CG310K in der Teufe -652 u. GOK richtungsabhängig zwischen 40 mm und 47 mm, wobei die Konvergenzraten zeitlich degressiv sind und Größenordnungsmäßig bis zu etwa 1mm/Jahr betragen. Es gibt Hinweise auf lithologische Effekte, wobei z. B. das Liniensalz zumeist höhere Konvergenzraten als die anderen Einheiten des Leinsteinsalzes, z. B. Orangesalz, aufweist.

Die Konvergenz-Messprofile für die Erkundungssohle weisen erhebliche Unterschiede der auftretenden Konvergenz zwischen den Infrastrurbereichen im Leinsteinsalz (z3) und den im Staßfurt-Steinsalz (z2HS) befindlichen Einlagerungsbereichen aus. Generell werden die höchsten Konvergenzraten mit bis zu 7 mm/(m·a) im Knäuelsalz (z2HS1) gemessen, und nehmen im Streifensalz (z2HS2) und im Kristallbrockensalz (z2HS3) bis auf unter 1 mm/(m·a) ab. Die Messwerte im Leinsteinsalz sind generell deutlich kleiner als 0,5 mm/(m·a), wobei stratigraphisch bedingt noch eine Abnahme vom älteren Liniensalz (z3LS) bis zum jüngeren Bank/Bändersalz (z3BK/BD) zu beobachten ist.

Vor der Schließung des Endlagers werden alle untertägigen Hohlräume zur Stabilisierung der geologischen Barriere „Wirtsgestein“ versetzt. Durch die Konvergenz des Hohlraumes wird der Salzgrusersatz kompaktiert und somit ein Stützdruck aufgebaut, der wiederum auf das Gebirge wirkt und die Konvergenzrate reduziert. Weiterhin werden Risse in der Auflockerungszone versetzter Strecken, Bohrlöcher und Schächte durch den Stützdruck rückgebildet und es finden Verheilungsprozesse statt. Mit fortschreitender Versatzkompaktion wird der Spannungsdeviator in der Salinarkontur soweit reduziert, bis isotrope Spannungszustände vorliegen. Nach vollständiger isostatischer Versatzkompaktion kommt die Konvergenz zum Stillstand.

45.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch die Konvergenz wird der für die Speicherung von Fluiden verfügbare Hohlraum in den Grubenräumen reduziert und gleichzeitig die Permeabilität im Salzgrusversatz bzw. in den Verschlussbauwerken verringert. Die Konvergenz hat daher Auswirkungen

auf den Fluiddruck in Grubenbauen und damit auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge und im Versatz, die wiederum die Konvergenz beeinflussen.

Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept ist die Konvergenz wesentlich, da sie der Motor für die Einspannung der geotechnischen Barrieren in das Gebirge und für die Kompaktion des Salzgrus-Versatzes ist, welcher zu späten Zeiten den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleistet.

Die Konvergenz wirkt sich direkt auf die Funktion der Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse sowie die Dichtpfropfen aus.

45.5 Zeitliche Beschränkung

Die Konvergenz setzt mit der durch die Auffahrung von Hohlräumen bedingten Spannungsumlagerung in der Gebirgskontur ein und wird so lange andauern, bis unter den vorliegenden Gebirgsdruckbedingungen kein kompaktierbarer Hohlraum mehr vorhanden ist.

45.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

45.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

45.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse

45.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Da im Erkundungsbergwerk Gorleben im Salinar Hohlräume aufgefahren werden, tritt in den Konturbereichen des Grubengebäudes zwangsläufig Konvergenz auf. Daher ist dieses FEP als „Randbedingung“ zu betrachten.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Infolge der Konvergenz werden die geotechnischen Barrieren im Gebirge eingespannt. Daher wirkt die Konvergenz direkt auf die Funktion die Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“ und „Streckenverschlüsse“ ein.

Wirkung in den Teilsystemen: Da die Konvergenz im gesamten Grubengebäude wirksam ist, ist sie in den Teilsystemen "Nahfeld", "Strecken und Schächte" sowie "Wirtsgestein" zu berücksichtigen.

45.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Versatz

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Fluiddruck

Salzgruskompaktion
 Lageverschiebung des Schachtverschlusses
 Wirtsgestein
 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe: Das Verfüllmaterial der Bohrlöcher (z. B. Erkundungsbohrlöcher, die mit MgO-Materialien verfüllt wurden) (gehört zu Inventar: Sonstige Stoffe) beeinflusst durch seine Materialeigenschaften die Konvergenz.

Versatz: Je nach Versatzmaterial (weich/steifer Einschluss) wird die Konvergenz unterschiedlich stark behindert.

Schacht-/Streckenverschlüsse, Dichtpfropfen: Durch das aufkriechende Gebirge wird in den Schacht- und Streckenverschlüssen bzw. in den Dichtpfropfen sowie in der Hohlraumkontur des Salinars ein Stützdruck aufgebaut, was zu einer Verringerung der Konvergenzrate führt. Die Versatzeigenschaften (weich/hart) bestimmen den Aufbau des Stützdruckes bzw. die Konvergenzentwicklung.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen kann zu einer Veränderung der für die Konvergenz wesentlichen Steifigkeitseigenschaften der Verschlüsse führen und damit die Konvergenz beeinflussen.

Technische Einrichtungen: Technische Einrichtungen, z. B. Streckenausbau, beeinflusst die Konvergenz.

Bohrlochverrohrung: Die Bohrlochverrohrung übt einen Stützdruck auf das Gebirge aus und beeinflusst so die Konvergenz.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Durch den Ausfall einer Bohrlochverrohrung reduziert sich der Stützdruck auf das Gebirge, so dass es wieder zur Konvergenz kommen kann.

Fluiddruck: Veränderungen des Fluiddrucks führen zu Spannungsänderungen im Salinar (z. B. Hohlrauminnendruck) und damit zu einer Beeinflussung des Konvergenzprozesses.

Salzgruskompaktion: Mit der Kompaktion des Versatzes ändern sich seine Steifigkeits-eigenschaften und es baut sich im Versatz sowie in der Hohlraumkontur des Salinars ein Stützdruck auf. Diese Spannungsänderungen beeinflussen den Konvergenzprozess.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: durch eine Lageverschiebung ändert sich der Stützdruck auf das Gebirge und damit auch die Konvergenz.

Resultierende FEP:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Begründungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Da Gase im Grubengebäude vorhanden sind und die Verschlussbauwerke nicht absolut gasdicht sind, kommt es durch die Konvergenz zu einer Gasströmung im Grubengebäude.

Beeinflusste FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Versatz

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Sonstige Verschlussbauwerke

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Fluiddruck

Salzgruskompaktion

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Porosität
Quellen des Bentonits
Auflockerungszone
Wirtsgestein
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Konvergenz führt zum Verschließen von Wegsamkeiten.

Versatz: Durch die Konvergenz kompaktiert der Versatz und ändert mit der Kompaktion seine Eigenschaften wie beispielsweise die Steifigkeit, die Dichte oder die Permeabilität.

Verschlussmaterial: Durch die Konvergenz kompaktiert das Verschlussmaterial und ändert mit der Kompaktion seine Eigenschaften wie beispielsweise Dichte oder Permeabilität

Schacht- und Streckenverschlüsse, Dichtpfropfen: Durch die Konvergenz werden die Schacht- und Streckenverschlüsse sowie die Dichtpfropfen eingespannt.

Technische Einrichtungen: Technische Einrichtungen, z. B. Streckenausbauten, werden durch die Konvergenz beeinflusst.

Bohrlochverrohrung: Die Bohrlochverrohrung wird durch die Konvergenz im Gebirge eingespannt.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Durch Konvergenz kann es – besonders wenn die mechanische Stabilität der Verrohrung durch Korrosion verringert wurde – zum Ausfall der Bohrlochverrohrung kommen.

Fluiddruck: In geschlossenen, Fluid gefüllten Grubenbauen bewirkt die Konvergenz einen Anstieg des Fluiddrucks.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Die Konvergenz bewirkt eine Hohlraumreduzierung und behindert somit Volumenänderungen.

Salzgruskompaktion: Die Konvergenz bewirkt die Kompaktion des Versatzes.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Konvergenzprozesse im Wirtsgesteins führen zu Spannungsänderungen in Schacht- und Streckenverschlüssen. Daraus resultierende Lageverschiebungen sind denkbar.

Porosität: Die Konvergenz bewirkt die Kompaktion von Versatz und Verschlussbauwerken. Eine Kompaktion ist bei porösen Stoffen mit einer Abnahme der Porosität verbunden.

Quellen des Bentonits: Das Quellen des Bentonits kann durch den konvergenzbedingten Spannungsaufbau eingeschränkt werden.

Auflockerungszone: Die Konvergenz bewirkt Spannungsänderungen in der Konturzone, die zu Schädigung (Auflockerung) führt. Mit fortschreitendem Rückgang der Deviatorspannungen infolge Stützwirkung durch Versatz werden Verheilungsprozesse aktiviert.

Wirtsgestein: Konvergenzprozesse führen im Wirtsgestein zu Spannungsumlagerungen.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Konvergenzprozesse und daraus resultierende Spannungsumlagerungen können zur Verheilung von Klüften im Wirtsgestein führen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Spannungsänderungen bzw. Spannungsumlagerungen und Konvergenz beeinflussen sich wechselseitig.

Bemerkungen:

Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter: Die Konvergenz wirkt nur indirekt über die Spannungen im Versatz auf die Behälter.

45.11 Offene Fragen

Während in den letzten Jahrzehnten verifizierte Stoffansätze entwickelt worden, die visko-elasto-plastische Prozesse im Steinsalz einschließlich dabei stattfindender Schädigungsprozesse gut beschreiben können (vgl. BMBF, 2006 und 2010), besteht für den

inversen Prozess, Verheilung von Steinsalz, noch ein erheblicher Kenntnisbedarf zur numerischen Beschreibung. Dies umfasst insbesondere auch die Einbeziehung feuchte-induzierter Prozesse (z. B. Feuchtekriechen) sowie die Wirkung von Fluiddruckeffekten.

45.12 Literaturquellen

BMBF (2006): Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. - Verbundvorhaben Stoffgesetzvergleich; einzelne Teilberichte mit den Förderkennzeichen 02C1004 bis 02C1054.

BMBF (2010): Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten von realen Untertagebauwerken im Steinsalz. - Verbundvorhaben Stoffgesetzvergleich Phase 2; einzelne Teilberichte mit den Förderkennzeichen 02C1577 bis 02C1607. Hunsche, U., Schulze, O. (1994): Das Kriechverhalten von Steinsalz. Kali und Steinsalz, 11, S. 238 - 255.

Weiterführende Literatur:

Bräuer, V., Eickemeier, R., Eisenburger, D., Grisseman, C; Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., Weber, J. R. (2011): Description of the Gorleben Site - Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. ISBN 978-3-9814108-0-8, 176 S.; Hannover.

Lux, K.-H. (2002): Gutachten im Auftrag des AkEnd, „Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften Teil A und B" sowie „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten". - TU Clausthal.

Hirse Korn, R.-P., Boese, B., Buhmann, D. (1999): Modellierung der Konvergenz von Salzgestein in LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-157; Braunschweig.

46 Fluiddruck (2.1.07.02)

46.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Fluiddruck wird der Druck von Lösungen und/oder Gasen in einem Grubengebäude bezeichnet.

46.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der Fluiddruck ist der an einem bestimmten Referenzpunkt in einem Grubenbau herrschende Druck im Gas bzw. in der Lösung. Während der Fluiddruck in der gesamten Gasmenge praktisch konstant ist, nimmt der Fluiddruck in der Lösung durch den hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule nach unten hin zu. Die Höhe der Flüssigkeitssäule hängt vom betrachteten Szenarium ab. Sie kann, z. B. bei einem teilweisen Zutritt von Salzlösungen, auf das Bergwerk beschränkt bleiben oder, bei einer vollständigen Flutung des Bergwerkes und einer hydraulischen Verbindung zu Deckgebirgslösungen über Undichtigkeiten in der Schachtabdichtung, auch bis zur Oberkante der Deckgebirgslösungen reichen. Treten Lösungen und Gase gleichzeitig in einem Grubenbau auf, so stehen sie an der Phasengrenze unter einem gemeinsamen Druck. Ab dieser Stelle erhöht sich in der Lösung nach unten hin der Druck hydrostatisch entlang der Flüssigkeitssäule.

Bei porösen Medien (z. B. Versatzkörper oder Auflockerungszone im Konturbereich) wirkt der Fluiddruck auf die äußeren Oberflächen und in den Porenräumen als Poren-
druck. Es sind ein hydrostatischer und ein hydrodynamischer Druckanteil zu unterscheiden. Der hydrostatische Druckanteil resultiert aus der Höhe der Flüssigkeitssäule, ihrer Dichte und der Erdbeschleunigung. Der hydrodynamische Druckanteil resultiert aus der kinetischen Energie einer strömenden Flüssigkeit gegenüber einer Oberfläche in dieser Strömung (auch als Staudruck bezeichnet) und hängt somit vom Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit und der Flüssigkeitsdichte ab (Xie 2002, Hou 2002). Bei den durch Konvergenz oder Gasbildung zu betrachtenden langsamen Strömungsprozessen in teilweise oder vollständig gefluteten Bergwerken wird der hydrodynamische Druckanteil meist vernachlässigt.

46.3 Sachlage am Standort

Die Höhe des Fluiddrucks hängt von der betrachteten Entwicklung des Endlagersystems ab.

- In den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle sind nur geringe Lösungsmengen (Restfeuchte im Salzgrus, Gebirgsfeuchte, Restfeuchte in den Behältern) zu unterstellen. In den Infrastrukturbereich einer Sohle können aus einem Lösungsreservoir in der Leine-Folge maximal 5.100 m^3 zufließen, sowie zusätzlich Deckgebirgslösungen durch die Schachtverschlüsse. In den Einlagerungsbereichen für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle werden neben der Restfeuchte im Salzgrusversatz und der Gebirgsfeuchte größere Lösungsmengen (ca. 6.772 t) mit den Abfallgebinden eingebracht. Daher wird der Fluiddruck während der ersten 50.000 Jahre durch die eingeschlossene Grubenluft und durch Gase aus der biogenen Degradation organischer Stoffe, der Metallkorrosion und der Radiolyse bestimmt. Nach der vorgesehenen Funktionsdauer (50.000 Jahre) der geotechnischen Barrieren ist ihr Versagen nicht ausgeschlossen, so dass die Infrastrukturbereiche mit Lösungen gefüllt werden können, weshalb die Infrastrukturbereiche als Speicherreservoir mit Schotter verfüllt sind.
- Bei einem vorzeitigen Versagen der Schachtverschlüsse oder stärkeren Lösungszutritten aus der Leine-Folge können gegebenenfalls auch größere Lösungsmengen in das Grubengebäude eindringen, so dass dann auch zu frühen Zeiten im Grubengebäude der Fluiddruck in der Flüssigkeit zu berücksichtigen ist. Bei vollständiger Lösungserfüllung besteht der Fluiddruck in der Referenzteufe aus einem hydrostatischen Druckanteil und gegebenenfalls aus einem zusätzlichen hydrodynamischen Druckanteil, der sich aus den Strömungswiderständen in den Grubenbauen und Barrieren ergibt. Bei einem frühzeitigen Lösungszutritt in das Grubengebäude kommt es nach Kontakt mit den Abfallbehältern durch Korrosionsvorgänge zu einer intensiven Gasbildung, so dass der Fluiddruck durch Lösung und Gas bestimmt wird.

Bei rascher und intensiver Gasbildung könnten hohe, über den lithostatischen Druck hinausgehende Fluiddrücke entstehen, sofern das gebildete Gas nicht abfließen kann. Untersuchungen (Popp et al. 2007) zeigen jedoch, dass es bei einem Gasdruckanstieg im Steinsalz nicht unmittelbar zu einem Gasfrac kommt, sondern dass sich eine Sekundärpermeabilität ausbildet, die einen weiteren Anstieg des Gasdrucks begrenzt (siehe FEP Infiltration von Fluiden in das Salzgestein). Erst bei Fluiddrücken, die 2 bis

4 MPa (= hydraulische Zugfestigkeit) größer als die kleinste Hauptspannung sind, kann es zu Rissbildung kommen.

46.4 Standortspezifische Auswirkungen

Der Fluiddruck ist auf vielfältige Weise für die Entwicklung des Endlagersystems relevant:

- er wirkt als Stützdruck direkt der Gebirgskonvergenz entgegen,
- erhöhte Fluiddrücke im Grubenbau führen daher zu einer Verlangsamung der Salzgruskompaktion,
- durch die Vergrößerung des Porendrucks kommt es zu einer Verlangsamung von Schädigungs- und Dilatanzrückbildungsprozessen,
- Fluiddrücke, die größer als die lokale kleinste Hauptspannung sind, können infolge der Verletzung des Minimalspannungskriteriums zu Fluidpermeation in das Gebirge oder bei einem sehr schnellen Druckanstieg zur Fracbildung (bleibende mechanische Schädigung) im Wirtsgestein führen,
- die Menge an sich bildenden bzw. von außen zutretenden Gasen und Flüssigkeiten im Grubenbau wird durch den Fluiddruck beeinflusst,
- viele physiko-chemische Prozesse, z. B. die Löslichkeit Gas in Salzlösungen, werden vom Fluiddruck beeinflusst,
- der Fluiddruck an einer geotechnischen Barriere stellt einen Lastfall dar, gegen den das Verschlussbauwerk ausgelegt wird.

46.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

46.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

46.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

46.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Wirtsgestein

46.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Der Fluiddruck ist ein (zeitlich veränderliches) Merkmal im Endlagersystem.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Ein erhöhter Fluiddruck führt zu einer erhöhten Beanspruchung der Initial-Barrieren und kann z. B. zur Bildung einer größeren Auflockerungszone beitragen. Er hat damit eine direkte Einwirkung auf das Wirtsgestein und die Verschlussbauwerke.

Wirkung in den Teilsystemen: Dieses FEP betrachtet den Fluiddruck innerhalb des Grubengebäudes und des umliegenden Wirtsgesteins sowie der Schacht- und Streckenverschlüsse. Die Druckverhältnisse im Deck- und Nebengebirge werden im FEP Grundwasserströmung in Deck- und Nebengebirge behandelt.

46.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lösungen im Grubenbau

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Quellen des Bentonits

Wärmeproduktion

Thermische Expansion oder Kontraktion

Gasmenge im Grubenbau

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Begründungen:

Bohrlochverrohrung: Zumindest in der Anfangsphase ist die Bohrlochverrohrung hydraulisch dicht und wirkt somit abdichtend gegen den angreifenden Fluiddruck.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Falls die Bohrlochverrohrung deformiert wird, ändert sich der Fluiddruck im Bohrlochinneren.

Konvergenz: Durch die Konvergenz wird infolge der Volumenänderung der Fluiddruck beeinflusst.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen: Alle Volumenänderungen wirken sich unmittelbar auf den Fluiddruck aus.

Lösungen im Grubenbau: die Anwesenheit von Lösungen ist Voraussetzung für einen Fluiddruck und beeinflusst über die Lösungsmenge bei gegebenem Volumen den Fluiddruck.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Bei der Strömung von Fluiden (z. B. durch hydrodynamische Prozesse) ändert sich ihr Druck.

Quellen des Bentonits: bewirkt Volumenänderungen im Grubengebäude.

Wärmeproduktion: Durch die Erwärmung kann sich bei verhinderter Ausdehnung der Druck in den Flüssigkeiten ändern.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Thermisch bedingte Ausdehnung und Volumenverringerng kann den Fluiddruck beeinflussen.

Gasmenge im Grubenbau: Die sich bildende Gasmenge im Grubenbau erhöht den Fluiddruck und kann die hydrostatischen Drücke in der Flüssigkeit beeinflussen.

Gasinfiltration: Abströmen von Gas ins Wirtsgestein wirkt als hydraulische Drossel und begrenzt den Gasdruckanstieg.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Sonstige Verschlussbauwerke

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Salzgruskompaktion

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Kanalisation in Dichtelementen

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Verdampfen von Wasser

Auflockerungszone

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Begründungen:

Schacht-/Streckenverschlüsse, sonstige Verschlussbauwerke: Der Fluiddruck wirkt unmittelbar auf die Verschlüsse bzw. bestimmt deren Integrität (z. B. Minimalspannungskriterium) und deshalb bei der technischen Auslegung zu berücksichtigen.

Bohrlochverrohrung: Solange die Bohrlochverrohrung hydraulisch dicht ist, wirkt auf sie, z. B. durch Zutritt aus dem Wirtsgestein oder durch Gasbildung in ihrem Innern ein Fluiddruck ein.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Der Fluiddruck - z. B. durch Gasbildung infolge Metallkorrosion - kann von innen und außen auf die Bohrlochverrohrung einwirken.

Konvergenz: Der Fluiddruck wirkt als Innendruck der Konvergenz entgegen.

Salzgruskompaktion: Der Fluiddruck wirkt als Innendruck der Konvergenz und damit der Salzgruskompaktion entgegen.

Vorzeitiges Versagen Schacht- bzw. Streckenverschlüsse oder Dichtpfropfen: Ein zu großer Fluiddruckanstieg kann zu einem Verschlussversagen führen (Verletzen des Minimalspannungskriteriums)

Lösungszutritt ins Grubengebäude. Der Fluiddruck kann Lösungszutritten in das Grubengebäude entgegenwirken.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Der Fluiddruck beeinflusst Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

Verdampfen von Wasser: Der wirkende Fluiddruck bestimmt die Verdampfungstemperatur.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein, Auflockerungszone: vorhandene Wegsamkeiten (Störungen und Klüfte) können hydraulisch abhängig vom Fluiddruck aufgeweitet werden.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Im Sinne des Effektivspannungskonzeptes beeinflusst ein Fluiddruck die im Material wirkenden Spannungen.

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein: Neuere Untersuchungen (Popp et al. 2007) zeigen, dass es bei einem Gasdruckanstieg im Steinsalz nicht zu einem Gasfrac kommt, sondern dass sich eine Sekundärpermeabilität ausbildet, die eine Gasinfiltration ins Salzgestein auslöst.

46.11 Offene Fragen

Der Fluiddruck beeinflusst indirekt viele Fragestellungen (z. B. Versatzkompaktion). Die entsprechenden offenen Fragen sind in den zugehörigen FEP beschrieben.

46.12 Literaturquellen

Hou, Z. (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung. - Habilitation an der TU Clausthal.

Popp, T., Wiedemann, M., Böhnelt, H., Minkley, W. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. - Abschlussbericht Forschungsvorhaben SR 2470, Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter.

Xie, Z. (2002): Rechnerische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien im Fall eines Lösungszutritts. - Dissertation an der TU Clausthal.

Weiterführende Literatur:

Rübel, A., Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit PTKA-WTE. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

Schulze, O. (2002): Auswirkung der Gasentwicklung auf die Integrität geringdurchlässiger Barrieregesteine. - BGR, unveröffentl. Ber.: 142 S., 27 Abb., 4 Tab., Anh. A-G; Hannover.

47 Salzgruskompaktion (2.1.07.03)

47.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Volumen des in das Grubengebäude eingebrachten Versatzes wird durch das Eigengewicht und die fortschreitende Konvergenz zu Lasten der Porosität reduziert.

47.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Bei Salzgrus handelt es sich um Bruchmaterial von Salzgestein, das während der Hohlraumauffahrung (schneidend oder sprengtechnisch) gewonnen wurde und infolge mechanischer Zerkleinerung im Brecher und Siebklassierung ein definiertes Korngrößenspektrum aufweist. Es wird mechanisch (z. B. Schleuderversatz oder Schiebeschild) in Hohlräume eingebracht. Die anfängliche Porosität von Salzgrusversatz liegt abhängig von der Einbautechnologie bei Werten zwischen 25 und 45 %, wobei die zu meist eckig ausgebildeten Körner (Bruchmaterial) mit ihren Spitzen auf Nachbarkörnern aufliegen und ein lockeres Haufwerk bilden.

Unter der Einwirkung von Kräften (Eigengewicht oder Gebirgsdruck durch Konvergenz) wird der Salzgrus zusammengedrückt und kompaktiert. Die Kompaktion von Salzgrus hängt ab von den herrschenden hydro-mechanischen Drücken (Fluiddruck, Gebirgsdruck), der Temperatur, den Materialeigenschaften (Zuschlagstoffe, Körnung) und der Verfügbarkeit von Feuchte, wobei die dabei wirkenden Verformungsmechanismen sich in ihrer Wirksamkeit bzw. Auswirkung in Abhängigkeit vom Kompaktionsgrad ändern. Unter Langzeitbedingungen stellt die Konvergenz der Hohlräume den entscheidenden Motor für die Salzgruskompaktion dar, wobei eine unmittelbare Rückkopplung über den im Salzgrus wirkenden Versatzdruck sowie den in den Poren wirkenden Fluiddruck stattfindet.

Der Salzgrus setzt den äußeren Kräften einen Widerstand entgegen, der mit zunehmender Kompaktion, d. h. Verringerung des Porenraums ansteigt (Verfestigung). Anfänglich dominieren plastische Deformationsprozesse (z. B. Kornverschiebung, -rotation und rupturale Kornzerkleinerung), wobei insbesondere Feuchtigkeit auf den Korngrenzen die Reibung deutlich herabsetzen kann. Bei weitgehender Kompaktion (Porosität kleiner 10 bis 20 %) geht das Kompaktionsverhalten von Salzgrus in Salzkriechen über, das die Verringerung des Porenvolumens fortsetzt, solange eine lokale

(im mikroskopischen Maßstab vorliegende) Spannungsdifferenz und kompaktierbarer Porenraum vorhanden ist (Popp et al. 2012). Die dabei nach Ausweis von Gefügeuntersuchungen wirksamen Verformungsmechanismen sind sowohl „klassisches“ Versetzungskriechen in der Halitmatrix als auch feuchtebasierte Drucklösungsmechanismen an den Korngrenzen (z. B. Spiers et al. 1990). Wegen des daraus resultierenden Materialverhaltens (z. B. Spannungsrelaxation, Kriechen), das durch visko-mechanische Prozesse bestimmt wird, ist davon auszugehen, dass sich die Salzgruskörner auch nach Aufbau des vollständigen Salzgrusversatzdruckes unter isostatischer Einspannung soweit verformen können, bis der vorhandene Porenraum unter Einschluss der im Salzgrus enthaltenen Fluide, die dann unter lithostatischem Druck stehen, eine entsprechende Endporosität in der Größenordnung 1 % (+/- 1 %) aufweist.

Als Basis zur Beschreibung der Salzgruskompaktion sind in der Vergangenheit umfangreiche Laboruntersuchungen (u. a. von der BGR und SANDIA) durchgeführt worden (z. B. Stührenberg & Zhang 1998, Stührenberg 2007, GRS, 2001). Abhängig von der Versuchsstrategie (z. B. beanspruchungstragender Kompaktionsversuch mit konstanter Last- bzw. Deformationsrate oder Kriechversuche unter konstanter Lasteinspannung) können für simulierte in-situ-Bedingungen Porositätswerte von kleiner als 10 % erreicht werden. Dass damit aber kein Endzustand erreicht ist, dokumentieren Untersuchungen an vorverdichteten Salzziegeln (Ausgangsporosität ca. 9 %), bei denen unter isostatischer Belastung ($p > 10$ MPa) und mit geringer Feuchtigkeitszugabe (ca. 0,5 %) Porositäten von ca. 1 – 2 % erreicht wurden (Salzer et al. 2007a). Als Beispiel für einen großmaßstäblichen Langzeit-Feldversuch umfasst das TSDE-Experiment (Thermal Simulation of Drift Emplacement) in der Asse eine Versuchszeit von ca. 8 Jahren, wobei die Salzgrusporosität von ursprünglich 35 % auf ca. 20 % in der aufgeheizten Zone abgenommen hat (Bechthold et al. 2004).

Beispiele aus dem Salzgewinnungsbergbau zeigen, dass die Salzgruskompaktion durch Konvergenz anfänglich relativ rasch erfolgen kann, wobei dieser Prozess wesentlich von den Materialeigenschaften (z. B. Korngrößenspektrum, feucht/trocken) und dem Endwert des sich einstellenden Versatzdruckes entsprechend der Teufenlage abhängt (z. B. Popp et al. 2012). Die Durchlässigkeit des Salzgrusversatzes reduziert sich während der Kompaktion kontinuierlich. Während die Durchlässigkeit des Salzgruses anfänglich um einige Größenordnungen über der Durchlässigkeit des Salzgebirges liegt, werden sich die Werte langfristig an die Gebirgswerte annähern.

In der Vergangenheit sind basierend auf den Labortests eine Vielzahl von Stoffansätzen für die analytische oder numerische Beschreibung der mechanischen Kompaktion von Salzgrus für den Einsatz als Versatzmaterial entwickelt worden (für einen Überblick s. Salzer et al. 2007b). Die meisten dieser Ansätze liefern nach endlichen Zeiten eine vollständige Kompaktion (z. B. HEIN-Ansatz: Hein 1991, Crushed WIPP Salt-Modell), während z. B. der Ansatz von Zhang et al. (1993), der die umfangreichen Laboruntersuchungen der BGR gut widerspiegelt, infolge seiner mathematischen Formulierung eine asymptotische Reduzierung der Porosität bei einer Extrapolation auf große Zeiten abbildet.

47.3 Sachlage am Standort

Im Rahmen des Endlagerkonzepts ist vorgesehen, dass während der Auffahrung der Hohlräume anfallender Salzgrus für die technischen Verschlussmaßnahmen in Strecken und Schächten eingebracht wird:

- ohne Zugabe von Feuchte als naturtrockener Salzgrus (Feuchtigkeitsgehalt ca. 0,02 %) mit einer Anfangsporosität von ca. 30 bis 40 %
 - in den Einlagerungsstrecken (Pollux-Behälter) und horizontalen Bohrlöchern und den Querschlägen
 - sowie den Einlagerungskammern für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle
- mit Zugabe von ca. 0,6 Gew.- % gesättigte $MgCl_2$ -Lösung in den Richtstrecken
- mit Zugabe von ca. 1,5 Gew.- % gesättigte $NaCl$ -Lösung im Schachtverschluss. Der angefeuchtete Salzgrus wird bei Einbau auf ca. 10 % Porosität (dynamische Vorkompaktion) vorkompaktiert.

Der als Versatzmaterial eingebrachte Salzgrus bewirkt eine Hohlraumreduzierung und trägt somit zur Stabilisierung der Grubenbaue bzw. Bohrlöcher bei. Gleichzeitig wird er sich infolge der Gebirgskonvergenz verdichten und übernimmt dann die Funktion eines langzeitstabilen Verschlussmaterials zur Verhinderung des Fluidtransports. Dabei setzt er den äußeren Kräften einen Widerstand entgegen, der mit zunehmender Kompaktion ansteigt. Vorläufige Modellrechnungen zum Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes zeigen, dass sich infolge der unter dem (bei wärmeentwickelnden Abfällen) vorherrschenden Temperaturfeld sehr effektiven Konvergenz innerhalb weniger Jahrzeh-

te ein Salzgrusversatzdruck in der Größenordnung des lithostatischen Teufendrucks entwickelt (Popp et al. 2012).

Nach Erreichen des teufendruckabhängigen Versatzdruckmaximums läuft die Salzgruskompaktion weiter, wobei das plastische Kompaktionsverhalten von Salzgrus in zeitlich abhängiges Salzkriechen übergeht. Die Verringerung des Porenvolumens setzt sich solange fort, bis die im Salzgrus eingeschlossenen Fluide einen Porendruck in der Größenordnung des wirkenden Versatzdruckes aufweisen. Aufgrund der gleichzeitig stattfindenden Verringerung der Salzgruspermeabilität sowie wegen kapillarer Sperrdruckeffekte wird für die hier vorliegenden geringen Feuchtigkeitsgehalte (abhängig von der Lösungszugabe zwischen ca. 0,5 bis 1,5 Gew.-%) eingeschätzt, dass die vorhandenen Feuchtigkeitsgehalte nicht ausgepresst, sondern als Haftwasser im Intergranularraum oder als fluiderfüllte Poren (mit Porendruck) im Salzgrus eingeschlossen werden. Simulationsrechnungen mit dem ZHANG-Modell unter Verwendung des Parametersatzes für trockenen (natürlicher Lösungsgehalt) Salzgrus dokumentieren, dass der Salzgrus unter den am Standort Gorleben vorherrschenden Randbedingungen innerhalb eines Zeitraumes von weniger als 1000 Jahren eine Porosität in der Größenordnung von 1 % (+/- 1 %) erreicht (Popp et al. 2012).

47.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch Konvergenzprozesse kriecht das Gebirge auf den Salzgrusversatz auf und verdichtet ihn, so dass die Porosität abnimmt. Durch die Stützwirkung des verdichteten Salzgrusversatzes auf die Hohlraumkontur kommt es zu einer Schädigungs- und Dilatanzrückbildung in der Auflockerungszone der Gebirgskontur. Die Verringerung des Porenraums bewirkt ggf. ein Auspressen vorhandener Flüssigkeiten und Gase, solange dafür eine Permeabilität vorhanden ist. Dabei fließen die Fluide entsprechend der Druckgradienten in Bereiche mit höheren Porositäten ab. Gas wird durch Diffusion langfristig die Barrieren durchdringen. Bei weit fortgeschrittener Salzgrusversatzkompaktion nähern sich die Eigenschaften des Salzgrusversatzes denjenigen des Salzgebirges an, wie durch die entsprechende Permeabilitäts/Porositäts-Beziehung ausgewiesen wird (Wieczorek et al. 2012). Dadurch entsteht im Laufe der Zeit eine zusätzliche Barriere gegen eine Ausbreitung von Radionukliden.

47.5 Zeitliche Beschränkung

Die Salzgruskompaktion wird so lange ablaufen, bis die effektive Porosität sehr gering wird, d. h. ca. 1 % (+/- 1 %) unter Einschluss der im Salz enthaltenen Fluide, die dann unter dem lithostatischen Druck bzw. dem Versatzdruck stehen können. Die Kompaktionsgeschwindigkeit wird wesentlich durch die Einbaudichte des Salzgruses, die vorhandene Feuchtigkeit, den Gebirgsdruck und den Fluiddruck in den Poren beeinflusst.

Im Ergebnis von Modellrechnungen ist zu erwarten, dass innerhalb weniger Jahrzehnte in den Einlagerungsbereichen die Versatzdrücke bis in die Größenordnung des Teufendrucks ansteigen (Popp et al. 2012).

Danach setzt sich infolge zeitabhängiger Kriechprozesse die Kompaktion fort, wobei für trockenen Salzgrus nach vorläufigen Simulationsrechnungen eine Porosität von 1 % (+/- 1 %) innerhalb von weniger als 1.000 Jahren erreicht wird, während für feuchten Versatz dieser Prozess deutlich schneller abläuft.

47.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

47.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

47.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

47.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Es liegt eine Vielzahl von Erfahrungen zur Versatzkompaktion durch fortschreitende Konvergenz im Salzbergbau und aus Forschungsvorhaben vor. Da in die Einlagerungs- und Zugangsstrecken auf jeden Fall Versatz aus Steinsalzgrus eingebracht wird, ist die zwingend folgende Versatzkompaktion eine immanente Randbedingung.

Beeinträchtigung der Initial-Barrieren: Die Versatzkompaktion bedingt unmittelbar eine Abnahme der Porosität und damit Reduzierung der Permeabilität. Durch das beeinflusste FEP "Durchströmung von geotechnischen Barrieren" ergeben sich damit indirekte Einwirkungen auf die Funktion der Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP wird in den Teilsystemen "Nahfeld" und "Strecken und Schächte" berücksichtigt.

47.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Konvergenz

Fluiddruck

Lösungen im Grubenbau

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Brennelement- und sonstige Endlagerbehälter: Die Stabilität der Behälter beeinflusst die Salzgruskompaktion.

Versatz: Die Versatzeigenschaften bestimmen primär dessen Kompaktionsverhalten.

Technische Einrichtungen: Streckenausbauten (gehören zu technischen Einrichtungen) beeinflussen die Salzgruskompaktion.

Konvergenz: Die Hohlraumkonvergenz beeinflusst die Salzgruskompaktion.

Fluiddruck: Der Fluiddruck kann der Hohlraumkonvergenz und damit der Salzgruskompaktion entgegenwirken.

Lösungen im Grubenbau: Durch anstehende Lösungen in den Grubenbauen und die Konvergenz können sich Lösungsdrücke aufbauen, die der Versatzkompaktion entgegenwirken.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Diese Vorgänge beeinflussen die Hohlraumkonvergenz und damit die Versatzkompaktion.

Resultierende FEP:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Begründungen:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Die Salzgruskompaktion führt zu einer nicht thermisch induzierten Volumenänderung.

Beeinflusste FEP:

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Konvergenz

Porosität

Kanalisation im Salzgrus

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Brennelement- und sonstige Endlager-Behälter: Die Salzgruskompaktion wirkt spannungsübertragend unmittelbar auf die Behälter.

Versatz: Als Folge der Versatzkompaktion ändern sich dessen Eigenschaften.

Technische Einrichtungen: Durch Salzgruskompaktion ändert sich der Stützdruck, der auf die technischen Einrichtungen (Streckenausbau) einwirkt.

Konvergenz: Durch die Versatzkompaktion wird die Konvergenz abgebremst.

Porosität: Die Versatzporosität ändert sich mit der Kompaktion.

Kanalisation im Salzgrus: Bei der Versatzkompaktion können stofflich/strukturelle Inhomogenitäten entstehen, die zu einer Kanalisation von Fließvorgängen führen können.

Auflockerungszone: Die Versatzkompaktion führt zu einem Stützdruckaufbau, der auf die Auflockerungszone einwirkt.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Versatzkompaktion führt zu einem Stützdruckaufbau, der die Spannungen im Konturbereich verändert.

47.11 Offene Fragen

Das Kompaktionsverhalten von Salzgrus für kleine Porositäten bedarf der Quantifizierung. Für diesen Bereich sind die Parametrisierungen für vorhandene Stoffansätze anzupassen.

Es gibt aktuell keinen Stoffansatz, der umfassend thermo-mechanische Wechselwirkungen sowie Feuchteinfluss auf das Kompaktionsverhalten beschreibt.

47.12 Literaturquellen

Bechthold, W. et al. (2004): "Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project)", Final Report; Brussels, EUR 20621.

GRS (2001): Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. GRS-173; Braunschweig.

Hein, H.-J. (1991): Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat. - Dissertation an der RWTH Aachen.

Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D. (2012): Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz – Synoptischen Prozessverständnis und Datenbasis, Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Leipzig, 30.05.2012.

Salzer, K., Popp, T., Böhnelt, H. (2007a): Mechanical and permeability properties of highly pre-compacted granular salt bricks. In K.-H. Lux, W. Minkley, M. Wallner, H.R. Hardy, Jr. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics; Proc. of the Sixth Conf. on the Mech. Behavior of Salt. Hannover 2007. Lisse: Francis & Taylor (Balkema): 239 - 248.

Salzer, K., Popp, T., Böhnelt, H. (2007b): Investigation of the Mechanical Behaviour of Precompacted Crushed Salt in Contact to the Host Rock. Report on adaptation of material laws to laboratory results. NF-PRO, D 3.5.6. Institut für Gebirgsmechanik GmbH; Leipzig.

Spiers, C.J., Schutjens, P.M.T.M., Brzesowsky, R.H., Peach, C.J., Liezenberg, J.L. Zwart, H.J. (1990): Experimental determination of the constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. In: Knipe, R.J. Rutter E.H. (eds) Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics. Geological Society special Publication 54: 215 - 227.

Stührenberg, D., Zhang, C. (1998): Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus. Projekt Gorleben. Endbericht zum AP 9G 21382100. - BGR, unveröffentl. Ber., 116922: 154 S., 75 Abb.; Hannover.

Stührenberg, D. (2007): Long-term laboratory investigation on backfill. - In K.-H. Lux, W. Minkley, M. Wallner, H.R. Hardy, Jr. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics; Proc. of the Sixth Conf. on the Mech. Behavior of Salt. Hannover 2007. Lisse: Francis & Taylor (Balkema): 223 - 229.

Wieczorek, K., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Czaikowsky, O., Navarro, M. (2012): Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus. Technischer Bericht, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Braunschweig.

Zhang, C. L., Schmidt, M. W., Staupendahl, G., Heemann, U. (1993): Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus. Bericht Nr. 93 -73 aus dem Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig.

48 Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.04)

48.1 Definition/Kurzbeschreibung

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen entstehen durch mineralogische Umwandlungen im Gebirge (z. B. Anhydrit <> Gips), chemische Prozesse (z. B. Korrosion von Metallen) bzw. materialspezifische Eigenschaften bei Feuchtigkeitsaufnahme oder -abgabe (z. B. bei Zementen und Betonen) sowie durch Setzung und Kompaktion von Verfüllmaterialien (z. B. Schotter und Sande). Als Sonderfall wird hier auch die Thermochemische Sulfatreduktion berücksichtigt. Nicht eingeschlossen in das FEP sind die Salzgruskompaktion und das Quellen von Bentonit, die als eigene FEP behandelt werden.

48.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In Salzstöcken können sich die anhydritischen Bereiche bei Einwirkung von Lösungen in Gips umwandeln, womit eine Volumenzunahme um 50 % verbunden ist.

Weiterhin kommt es im Bergwerk bzw. im Endlager bei der Korrosion von metallischen Abfällen und Endlagerbehältern sowie von eventuell im Endlager verbleibender technischer Einrichtungen (Schienen, Anker, Kabel etc.) zu einer Volumenzunahme. Rost (FeOOH) hat mit $25,37 \text{ cm}^3/\text{mol}$ das 3,6-fache Molvolumen von Eisen ($7,1 \text{ cm}^3/\text{mol}$). Daher steigt das Volumen von Eisen durch Korrosion um mindestens diesen Faktor an. Durch Porosität und Wassereinlagerung kann die Volumenvergrößerung auch wesentlich größer sein.

Die Verschlusskonzepte vieler Bergwerke sehen die Verwendung von Bentonit in Dichtelementen vor. Voraussetzung für die Funktion als Dichtmaterial ist das Quellen des Bentonits durch Aufsättigen mit Wasser. Dieser Prozess wird in einem eigenen FEP beschrieben.

Bei Salz- und Sorelbetonen, die als Barrierenbaustoffe vorgesehen sind, kann es während des Abbindens beim Einbringen zum Schrumpfen kommen (Betriebsphase, wird hier nicht betrachtet) bzw. bei der Durchströmung von salinaren Lösungen zum Quellen.

Hinsichtlich der Volumenänderung durch Temperatur wird auf das FEP Thermische Expansion und Kontraktion verwiesen.

48.3 Sachlage am Standort

Das Vergipsen anhydritischer Wirtsgesteinsbereiche ist vor allem am Salzspiegel zu beobachten. Falls es in der Nachverschlussphase zu einem Zutritt von Deckgebirgslösungen über die Schächte kommt, können derartige Prozesse aber in allen Bereichen des Grubengebäudes auftreten, die anhydritische Gesteine aufschließen (vor allem Schächte und Infrastrukturbereich) und von Lösungen erreicht werden. Die starke Volumenzunahme (50 %) durch Vergipsen kann zu Rissbildungen im umgebenden Gebirge aber auch zur Selbstabdichtung vorhandener Störungen führen.

Anhydrite können bei Temperaturen $>80\text{ °C}$ und der Verfügbarkeit von Wasserstoff von einer thermochemischen Sulfatreduktion betroffen sein, wobei die Reaktionsprodukte eine Volumenzunahme von 10 % gegenüber den Edukten aufweisen (Weber et al. 2011, vgl. FEP Thermochemische Sulfatreduktion).

Im Endlagerbergwerk sind große Metallmengen in Form von Abfällen, Endlagerbehältern und technischen Einrichtungen vorhanden (siehe FEP Inventar: Metalle), die während der Nachverschlussphase bei Vorhandensein von Lösungen korrodiert werden. Die dabei entstehenden Oxide weisen das ca. 3,6-fache Volumen des Ausgangsproduktes auf.

Bei der Zersetzung der Glasmatrix der Wiederaufarbeitungsabfälle entstehen Tonminerale, die zu einer leichten Volumenzunahme im Vergleich zu den Edukten führen.

Im betrachteten Endlagersystem ist neben dem Salzgrus, dessen Kompaktion in einem eigenen FEP behandelt wird, auch Basalt- bzw. Serpentinitschotter als Versatz im Infrastrukturbereich und als Widerlager/Speicher in den Schachtverschlüssen vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2011). Außerdem wird der Resthohlraum in der Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher nach der Beladung mit Kokillen mit Quarzsand verfüllt (Bollingerfehr et al. 2012). Diese Materialien werden sich nach der Einbringung setzen und sich dadurch die Porosität und Permeabilität sowie das Volumen reduzieren (Breidung 2002). Sobald die Schotterkörper im Gebirge eingespannt sind, kommt die Setzung zum Erliegen.

Salz- und Sorelbetone, die als Baustoffe für geotechnische Barrieren vorgesehen sind, weisen bei Durchströmung mit Lösungen ein geringes Quellvermögen auf. Falls erforderlich wird diese Baustoffeigenschaft bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt.

Das Quellen von Bentonit nach Zutritt von Grundwasser ist eine Voraussetzung für die Funktion der Dichtelemente in Schachtverschlüssen und wird daher in einem eigenen FEP beschrieben (Quellen des Bentonits).

48.4 Standortspezifische Auswirkungen

Vergipsungsprozesse in anhydritischen Gesteinen aufgrund von Lösungszutritten können zu lokalen Beeinträchtigungen der Gebirgsintegrität durch Rissbildung führen.

Die thermochemische Sulfatreduktion von anhydritischen Gesteinen kann aufgrund der erforderlichen hohen Temperaturen nur im Nahbereich der Einlagerungsfelder auftreten. Durch die Volumenzunahme kann es hier möglicherweise zu konturnahen Auflockerungen kommen.

Das obere Schachtdichtelement wird in beiden Schächten aus Bentonit erstellt. Nach dem Zutritt des Grundwassers kommt es zum Quellen des Bentonits. Dabei ist durch eine entsprechende Rezeptur des Dichtmaterials sichergestellt, dass der Quelldruck die Integrität des angrenzenden Gebirges nicht beeinträchtigt.

Durch die Errichtung von Betonfundamenten unterhalb der Dichtelemente kann es auch bei Setzungen der Basalt-/Serpentinit-schotterssäule in der frühen Nachverschlussphase (z. B. durch Erdbeben) nicht zu Lageverschiebungen der Schachtverschlüsse kommen, die die Funktion beeinträchtigen würden.

Das Quellen der Salz- bzw. Sorelbetone bei einer Durchströmung wird bei der Auslegung der geotechnischen Barrieren berücksichtigt. Bei entsprechender Einspannung der Barrieren können diese Volumenänderungen aber die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflussen und ggf. zu Rissbildungen oder zur Selbstabdichtung führen.

Alle Volumenänderungen von Materialien im Grubengebäude beeinflussen die Hohlraumvolumina und damit die Volumina in den Grubenbauen, die als Speicherraum oder Transportpfade für Fluide zur Verfügung stehen. Da aber Art, Umfang, Ort und Zeit-

punkt eines möglichen Lösungszutritts ungewiss sind, ist keine Volumenbilanz bezüglich einer Volumenänderung durch das Quellen von Materialien im Endlager möglich.

48.5 Zeitliche Beschränkung

Das FEP umfasst eine Reihe unterschiedlicher Prozesse (z. B. thermochemische Sulfatreduktion), die zeitlich konkretisierbare Randbedingungen (z. B. Aufheizung durch Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle) ausgelöst werden (z. B. thermochemische Sulfatreduktion) und dann durch zeitlich begrenzt sind, und andererseits Prozesse (z. B. Metallkorrosion, Vergipsung), die zeitlich nicht spezifiziert werden können, da das Auftreten der auslösenden Ereignisse (z. B. Lösungszutritt) zeitlich nicht konkretisiert werden kann.

48.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

48.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

48.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Wirtsgestein

48.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Volumenänderungen gehören zu den material-spezifischen Eigenschaften einiger vorgesehener Baustoffe (z. B. Bentonit, Salz- und Sorelbeton). Außerdem kann es beim Lösungszutritt zu Anhydritlagen zu einem Quellen durch Vergipsen kommen. Daher wird die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses FEP als "wahrscheinlich" eingestuft.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das Quellen von Betonbaustoffen kann die Funktion der Initial-Barrieren „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“ beeinträchtigen. Die Funktion der Initial-Barriere "Wirtsgestein" kann durch ein Vergipsen von Anhydritlagen beeinträchtigt werden.

Wirkung im Teilsystem: Das FEP ist in den Teilsystemen "Nahbereich", "Strecken und Schächte" sowie "Wirtsgestein" zu berücksichtigen.

48.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Salzgruskompaktion

Quellen des Bentonits

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Begründungen:

Quellen des Bentonits: führt zu einer deutlichen Volumenzunahme. Wird in einem speziellen FEP beschrieben.

Salzgruskompaktion: führt zu einer Volumenabnahme. Wird in einem speziellen FEP beschrieben

Korrosion der Brennstoffmatrix, Metallkorrosion: Die bei der Korrosion der Brennstoffmatrix und der Metallkorrosion von Behältern oder Einrichtungen entstehenden Oxide weisen ein größeres Volumen als der Ausgangsstoff auf.

Korrosion von Glas: Die bei der Korrosion von Glas entstehenden Tonminerale haben ein größeres Volumen als das Glas.

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Versatz

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Konvergenz

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe, Versatz: Die Eigenschaften des Schotters (Infrastrukturbereich, Schächte) und des Sandes (Einlagerungsbohrlöcher) beeinflussen die Setzung des Materials.

Verschlussmaterial: Das Quellvermögen gehört zu den materialspezifischen Eigenschaften verschiedener Verschlussmaterialien.

Strecken- und Schachtverschlüsse, Sonstige Verschlussbauwerke: Das Design der Strecken- und Schachtverschlüsse bzw. Dichtpfropfen beeinflusst das Quellen der Materialien.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Bei der Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen entstehende Umwandlungsprodukte können sich ebenfalls durch eine Volumenzunahme auszeichnen.

Konvergenz: Die Konvergenz überträgt den Gebirgsdruck auf die Verschlussbauwerke und wirkt dem Aufquellen der Baumaterialien entgegen.

Lageverschiebung des Schachtverschluss: Umwandlungen des Wirtsgesteins können zu einer Lageverschiebung des Schachtverschluss führen.

Lösungen im Grubenbau: Die Lösungen im Grubenbau führen zu einer Aufsättigung der Baumaterialien mit Lösung und initiieren damit eine Volumenzunahme durch Aufquellen sofern dieser Prozess nicht durch die Einspannung im Gebirge behindert wird.

Geochemisches Milieu: Vom geochemischen Milieu im Grubenbau hängt es ab, ob es zu einer Volumenzunahme durch Baustoffquellen kommt.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Je nach geochemischem Milieu entstehen bei der Korrosion von zement- oder sorelhaltigen Stoffe Umwandlungsprodukte, die sich durch eine leichte Volumenzunahme gegenüber dem Ursprungsstoff auszeichnen.

Spannungsänderung und Spannungumlagerung: Die Spannungen im umgebenden Gebirge können dem Quellen der Baustoffe entgegen wirken.

Thermochemische Sulfatreduktion: Bei der thermochemischen Sulfatreduktion können – je nach Randbedingungen – Reaktionsprodukte entstehen, die sich durch eine Volumenzunahme gegenüber dem Ausgangsmaterial auszeichnen.

Bemerkungen:

Auflösung und Ausfällung: Das FEP beeinflusst die Volumenänderungen indirekt über die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Versatz

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Bohrlochverrohrung

Fluiddruck

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Porosität

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe, Versatz: Die Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher wird mit Quarzsand verfüllt und im Infrastrukturbereich und in den Schächten wird Schotter als Versatz bzw. Widerlager/Speicher eingebracht. Die Setzung dieser Materialien hängt von ihren Eigenschaften ab.

Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, sonstige Verschlussbauwerke: Durch ein Quellen von Verschlussmaterialien ändern sich die Eigenschaften des Verschlussmaterials sowie der Schacht- und Streckenverschlüsse bzw. Dichtpfropfen.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Falls es bei dieser Volumenänderung zu Rissbildungen kommt, so beeinflussen die neu geschaffenen Wegsamkeiten die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Bohrlochverrohrung: Nach der Setzung der Sandverfüllung in der Verrohrung übt diese einen Stützdruck auf die Bohrlochverrohrung aus.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: Umwandlungen des Wirtsgesteins können zu einem Versagen des Schachtverschlusses führen.

Fluiddruck: Da es sich bei einem Endlager in der Nachverschlussphase um ein quasi geschlossenes System handelt, führt eine Volumenänderung von Materialien lokal zu einer Änderung des Fluiddrucks im Endlagersystem und beeinflusst die Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Setzungen in der Schottersäule können zur Lageverschiebung eines Schachtverschlusses führen.

Porosität, Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Durch die Volumenänderungen der Materialien ändern sich auch deren Porosität sowie die Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

Geochemisches Milieu: Die Umwandlungsprozesse, die zu den Volumenänderungen führen, beeinflussen das geochemische Milieu.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Außerdem bestimmt die Volumenänderung von Verschlussmaterialien den Stützdruck der Barriere, der dem Gebirgsdruck entgegengerichtet ist, und sich daher auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge auswirkt.

Bemerkungen:

Konvergenz: Die Konvergenz wird indirekt über die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen beeinflusst.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: Durch den Einbau eines Betonwiderlagers unterhalb des Bentonitdichtelementes können Setzungen in der Schottersäule nicht mehr zum Versagen des Dichtelementes führen.

48.11 Offene Fragen

- Ermittlung der Volumenänderung der Behältermaterialien durch Korrosion
- Ermittlung der Volumenänderung der Versatz- und Barrierematerialien sowie anstehenden Gesteine durch Austrocknung und Durchfeuchtung

48.12 Literaturquellen

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Breidung, K. (2002): Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. - BMBF-gefördertes Vorhaben, Kennz.: 02C0516, Kali u. Salz GmbH; Kassel.

Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P., (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Weber, J. R., Hammer, J., Schulze, O. (2011): Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Projekt Gorleben GE442800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), unveröffentl. Bericht, B3.2/B50123-09/2011-0001: 28 S.; Hannover.

49 Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses (2.1.07.05)

49.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt das Versagen eines Schachtverschlusses durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen bzw. eine Kombination verschiedener Einwirkungen, die zu einer signifikanten Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit gegenüber dem Ausgangswert innerhalb der geplanten Funktionsdauer führen.

Unter einem vorzeitigen Versagen wird hier eine Beeinträchtigung der Funktion des Gesamtsystems, nicht einzelner Elemente verstanden. Das FEP wird in dieser integrierten Form im FEP-Katalog beschrieben, um sicherzustellen, dass die Auswirkungen eines Versagens des Gesamtsystems in der Systementwicklung behandelt werden.

49.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Auf die Schachtverschlüsse wirkt während der Nachverschlussphase eine Vielzahl von äußeren Einflüssen ein, die entsprechend ihrer Art, Ausprägung und Häufigkeit zu charakterisieren sind. Ausgehend von den Ergebnissen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden diese erwarteten Einwirkungen bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt.

Alterungsprozesse von Materialien werden hier nicht betrachtet, da die Materialien so gewählt worden sind, dass sie unter den möglichen Bedingungen im Endlager während der vorgesehenen Funktionsdauer stabil sind und dass „gealterte“ Materialien immer noch ausreichende Verschlusseigenschaften aufweisen. Außerdem können durch geometrische Überdimensionierung ("Opferschicht") Alterungsprozesse sowie Materialabtrag berücksichtigt werden. Diese wird so bemessen, dass es zu keiner Zeit innerhalb der vorgesehenen Funktionsdauer zu einer Herabsetzung der auslegungsrelevanten Materialeigenschaften bzw. erforderlichen Bauteilabmessungen kommen kann.

49.3 Sachlage am Standort

Die Planung der Komponenten der Schachtverschlüsse berücksichtigt die Materialalterung sowie thermomechanische, hydraulische und chemische Einwirkungen auf die Barrieren, die während der zukünftigen Entwicklung erwartet werden (Linkamp & Müller-Hoeppe 2012, Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011). Prinzipiell kommen folgende Schadensmechanismen in Frage, die zu einem vorzeitigen Versagen des Schachtverschlusses beitragen können:

Erdbeben: Bei einem Erdbeben zu einem frühen Zeitpunkt, wenn die Schachtelemente noch nicht vollständig im Gebirge eingespannt sind, kann es zu Setzungen und Abrissen an der Schachtkontur kommen. Auch bei späteren Erdbeben hoher Intensität kann es ggf. zur Rissbildung in den Betonelementen oder zu Spannungsänderungen im angrenzenden Gebirge kommen.

Diapirismus: In den sehr heterogen aufgebauten Schichten der Leine-Folge (z3) kann es innerhalb von 50.000 Jahren zu stärkeren, asymmetrischen Verschiebungen von bis zu 1 m durch Salzstockbewegungen (Diapirismus) kommen. Hieraus können ggf. Lageverschiebungen und Konturabbrisse der Schachtverschlusselemente resultieren.

Chemische Einwirkungen:

- das geochemische Milieu entwickelt sich in anderer Weise als prognostiziert mit der Folge, dass der Beton korrodiert und sich die hydraulische Leitfähigkeit erhöht,
- durch das ungleichmäßige Quellen des Bentonits schließt sich die Auflockerungszone nicht in der vorgesehenen Weise und die hydraulische Leitfähigkeit ist erhöht

Mechanische, thermische und hydraulische Einwirkungen:

- anisotrope Spannungsverhältnisse im Gebirge, z. B. durch ungleichmäßigen Wärmeeintrag infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle, kann zu Lageverschiebungen oder Rissbildungen im Baustoff, in der Kontaktzone Gebirge/Barriere, in der Auflockerungszone und/oder im Gebirge kommen. In der Folge kann eine Umströmung des Schachtverschlusses auftreten.
- die Schachtverschlüsse werden durch Deckgebirgslösungen angeströmt. Weiterhin werden Lösungen im Grubengebäude durch die Konvergenz in Richtung auf die Schächte ausgepresst. Falls die resultierenden Fluiddrucke zu niedrig abgeschätzt

wurden, kann es zu Lageverschiebungen und Konturabrissen der Schachtverschlusselemente kommen.

- Eine intensive Gasbildung während der Nachverschlussphase, die zu einem Überdruck führt, kann zum Aufreißen von Rissen am Kontakt Gebirge/Barriere oder in der Auflockerungszone führen.

Kanalisation im Dichtelement: falls es bei der Errichtung zur Kanalisation im Baukörper gekommen ist, so kann sich ein Strömungskanal mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ausbilden.

Die Schachtverschlüsse umfassen prinzipiell den gesamten Schacht. Die für die Langzeitsicherheit relevanten Widerlager und Dichtelemente sind aber unterhalb der Stützringe der Schachtfundamente angeordnet, oberhalb wird der Schacht entsprechend berg- und wasserrechtlichen Anforderungen verfüllt.

Im Folgenden wird nur der untere für die Langzeitsicherheit relevante Teil betrachtet. Die entsprechenden Schachtverschluss-Komponenten werden in den Schächten gemäß den geologischen Verhältnissen ausgelegt und angeordnet. Dabei begrenzen die Dichtelemente neben dem vertikalen Lösungsstrom auch laterale Lösungszutritte aus potentiellen Zutrittspfaden, wie z. B. aus der Gorlebenbank. Als Anpassung an den Chemismus möglicherweise zutretender Lösungen besteht das obere Dichtelement aus Bentonit, das mittlere aus Salzbeton und das untere aus Sorelbeton. Das Quellen dieser Baustoffe wird bei der Auslegung berücksichtigt. Durch Qualitätssicherungsmaßnahmen wird gewährleistet, dass es nicht infolge von Fehlern beim Einbau der Dichtelemente zu Piping-Effekten und Kanalisationen kommt, die die Dichtwirkung der Barriere beeinträchtigen.

Für die Widerlager wird im unteren Teil Sorelbeton und Salzbeton verwendet, in den höheren Teilen des Schachtes setzungsarmer und langzeitstabiler Basalt/Serpentinitotter, der auch als Fluidspeicher dient. Außerdem wird hier zur Aufsättigung von aus dem Hangenden zutretenden Lösung Bischoffit eingebracht. Durch die Widerlager wird weitgehend verhindert, dass sich die Dichtelemente verschieben und es zu Abrissen an der Schachtkontur und damit zu Umläufigkeiten in der Kontaktzone kommt.

Um eine rasche Dichtfunktion der Schachtverschlüsse zu gewährleisten, wurden die heutigen Randbedingungen (Geologie/Hydrogeologie) bei der Auslegung zugrunde ge-

legt. So wurden die Baumaterialien und die Gesamtkonstruktion entsprechend dem derzeitigen Chemismus von Deckgebirgs- und Wirtsgesteinlösungen ausgewählt (Linkamp & Müller-Hoeppe 2012, Engelhardt et al. 2011). Alle möglicherweise in Zukunft auf die Bauwerke einwirkenden Beanspruchungen (vgl. Mrugalla 2011) sowie die Alterungsprozesse der Baustoffe werden, soweit bekannt, in der Auslegung ebenfalls berücksichtigt. Falls die zukünftige Standortentwicklung von der prognostizierten Entwicklung abweicht, können die Barrieren in ihrer Funktion beeinträchtigt werden.

Aufgabe der Schachtverschlüsse ist es, einen Lösungszutritt aus dem Deckgebirge bzw. eine Freisetzung kontaminierter Lösungen und Gase aus dem Grubengebäude so lange zu verhindern bzw. zu begrenzen, bis der Salzgrus-Versatz soweit kompaktiert ist, dass er diese Einschlussfunktion gewährleisten kann. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand wird die Salzgruskompaktion in wenigen 1.000 Jahren entsprechend weit fortgeschritten sein. Die Rahmenbedingungen und Entwicklungen bis zum Maximum der nächsten Kaltzeit in ca. 50.000 Jahren sind relativ gut prognostizierbar. Daher ist es sinnvoll diesen Zeitraum als Funktionszeitraum für die geotechnischen Barrieren festzulegen. Durch diese Festlegung werden auch noch vorhandene Ungewissheiten bei der Prognose der Salzgruskompaktion abgedeckt.

Kaltzeitliche Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse werden hier nicht berücksichtigt, da sie erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auftreten.

Um das vorzeitige Versagen der Schachtverschlüsse in den Restrisikobereich zu verschieben, bestehen die Schachtverschlüsse aus drei voneinander entkoppelten Dichtelementen, für deren Langzeitfunktion Einzelnachweise geführt werden.

Ein gleichzeitiges Versagen von drei unabhängigen Dichtelementen ist nach den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) nicht zu unterstellen und daher auch nicht zu betrachten. Bei demonstriertem Nachweis der funktionalen Unabhängigkeit der Dichtelemente ist ein gleichzeitiges Versagen aller Dichtelemente daher auszuschließen. Da dieser Nachweis bislang noch nicht geführt wurde, wird an dieser Stelle das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses, das heißt das gleichzeitige Versagen aller Dichtelemente als „weniger wahrscheinlich“ unterstellt.

49.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses setzt das gleichzeitige Versagen aller drei Dichtelemente voraus und würde zum verstärkten Vordringen von Lösungen in das Grubengebäude führen. Auch könnten möglicherweise kontaminierte Lösungen und Gase aus dem Grubengebäude austreten.

49.5 Zeitliche Beschränkung

Ein mögliches Versagen der Schachtverschlüsse ist nur während ihrer geplanten Funktionsdauer (50.000 Jahre) sicherheitstechnisch relevant.

49.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

49.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

49.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschluss

49.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Bei demonstriertem Nachweis der funktionalen Unabhängigkeit der Dichtelemente ist ein gleichzeitiges Versagen aller Dichtelemente auszuschließen. Da dieser Nachweis bislang noch nicht geführt wurde, ist eine Zuordnung zur Wahrscheinlichkeitsklasse „nicht zu betrachten“ nicht zulässig. Eine Zuordnung zur Wahrscheinlichkeitsklasse „wahrscheinlich“ kann auf Grund des gewählten Schachtverschlusskonzeptes und der durchzuführenden QS-Maßnahmen ausgeschlossen werden. Daher wird an dieser Stelle das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses, das heißt das gleichzeitige Versagen aller Dichtelemente als „weniger wahrscheinlich“ unterstellt.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Ein vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses beeinträchtigt die Funktion der Initial-Barriere "Schachtverschlüsse".

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist im Teilsystem "Strecken und Schächte" zu berücksichtigen.

49.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben
 Diapirismus
 Schachtverschlüsse
 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
 Fluiddruck
 Lageverschiebung des Schachtverschlusses
 Kanalisierung in Dichtelementen
 Quellen des Bentonits
 Auflockerungszone
 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Erdbeben: ein Erdbeben führt zu Setzungen in der Schottersäule und zu Spannungen in den Betonelementen der Schachtverschlüsse.

Diapirismus: Salzbewegungen führen zu Verschiebungen der Schachtverschlüsselemente und können deren Funktion beeinträchtigen.

Schachtverschlüsse: Die Eigenschaften der Schachtverschlüsse und die Einwirkungen auf die Barrieren bestimmen, ob bzw. wann es zu einem vorzeitigen Versagen eines Schachtverschlusses kommen kann.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Falls die zukünftigen Umweltbedingungen von der prognostizierten Entwicklung abweichen, kann es zur Alteration der Schachtverschlüsse kommen. Hieraus kann bei entsprechender Intensität der Alteration ein vorzeitiges Versagen der Schachtverschlüsse resultieren.

Fluiddruck: Falls der Fluiddruck die bei der Auslegung des Schachtverschlusses zugrunde gelegte Intensität überschreitet, kann es zum vorzeitigen Versagen des Schachtverschlusses kommen.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses, Kanalisierung in Dichtelementen: Diese beiden Entwicklungen können bei entsprechender Ausprägung zu einem vorzeitigen Versagen der Verschlüsse führen.

Quellen des Bentonits: Falls sich der Bentonit in den oberen Dichtelementen zu langsam oder ungleichmäßig aufsättigt, kann es zum Piping und damit zum Versagen des Dichtelementes kommen.

Auflockerungszone: Die Abdichtung der Auflockerungszone ist entscheidend für die Funktion der Verschlüsse. Falls sich die Auflockerungszone im Bereich eines Verschlusses nicht in der vorgesehenen Weise schließt, kann es zu Umläufigkeiten und zum vorzeitigen Versagen des Verschlusses kommen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Bei einer signifikanten Abweichung der Spannungsverhältnisse im Gebirge von den bei der Auslegung unterstellten Verhältnissen kann es zum vorzeitigen Versagen eines Schachtverschlusses kommen.

Bemerkungen:

Verschlussmaterial: Das Verschlussmaterial beeinflusst indirekt über die Schachtverschlüsse das vorzeitige Versagen.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung: Durch den Einbau von Betonwiderlagern unterhalb der Bentonitdichtelemente können Setzungen in der Schottersäule nicht mehr zur Beeinträchtigung der Funktion der Bentonitdichtelemente führen.

Zersetzung von Organika: Da die vorgesehenen Schachtverschlüsse keine organischen Dichtmaterialien (Asphalt, Bitumen) enthalten, ist das FEP Zersetzung von Organika für das Versagen von Schacht- und Streckenverschlüssen nicht relevant.

Geochemisches Milieu: Das geochemische Milieu wirkt nicht unmittelbar auf die Schachtverschlüsse, sondern über die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Resultierende FEP:

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Begründungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses führt zum Lösungszutritt ins Grubengebäude

Beeinflusste FEP:

Schachtverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Porosität

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Schachtverschlüsse: Das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses führt zu einer Änderung der Eigenschaften des Verschlusses.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Die erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten infolge eines Versagens des Schachtverschlusses können zu einer verstärkten Alteration der Verschlüsse führen.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Nach einem Versagen des Schachtverschlusses (z. B. durch Konturabriss der Dichtelemente) kann es zu weiteren Lageverschiebungen des Schachtverschlusses kommen.

Porosität: Bei einem vorzeitigen Versagen verfügt ein Schachtverschluss über eine erhöhte Porosität.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Wenn nach einem vorzeitigen Versagen der Verschlüsse die mechanische Stabilität der Barrieren beeinträchtigt ist, wird der Stützdruck, den die Barriere auf das Gebirge ausübt, erniedrigt, so dass im Gebirge Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge stattfinden.

Bemerkungen:

Metallkorrosion: Die Metallkorrosion wird nur indirekt über die zutretenden Lösungen durch ein Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses beeinflusst.

Die Konvergenz wird indirekt über die Spannungsänderungen im Gebirge beeinflusst.

49.11 Offene Fragen

Versagensmechanismen (thermomechanisch, chemisch, hydraulisch)

49.12 Literaturquellen

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Linkamp, M., Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J. (2012): Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Lux, K.-H., Eberth, S., Düsterloh, U. (2006): Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barrierenintegritäts- und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien mit besonderer Berücksichtigung der Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie. - Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 02C0720. Professur für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal; Clausthal-Zellerfeld.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M. (2012a): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren –Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2002): Closure Concept for the Morsleben LLW Repository for Radioactive Waste. Design of the Drift Seals in a former Salt Mine.- Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case. Workshop Proceedings; Oxford, UK.

Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2003): Repository Seal Requirements and Design. - EBS-Design Requirements and Constraints. Workshop; Turku, Finland.

50 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses (2.1.07.06)

50.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt das Versagen eines Streckenverschlusses durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen bzw. eine Kombination verschiedener Einwirkungen, die zu einer signifikanten Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit gegenüber dem Ausgangswert innerhalb der geplanten Funktionsdauer führen.

Unter einem vorzeitigen Versagen wird hier eine Beeinträchtigung der Funktion des Gesamtsystems, nicht einzelner Elemente verstanden. Das FEP wird in dieser integrierten Form im FEP-Katalog beschrieben, um sicherzustellen, dass die Auswirkungen eines Versagens des Gesamtsystems in der Systementwicklung behandelt werden.

50.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Auf die Streckenverschlüsse wirkt während der Nachverschlussphase eine Vielzahl von äußeren Einflüssen ein, die entsprechend ihrer Art, Ausprägung und Häufigkeit zu charakterisieren sind. Ausgehend von den Ergebnissen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden diese erwarteten Einwirkungen bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt.

Alterungsprozesse von Materialien werden hier nicht betrachtet, da die Materialien entweder so gewählt worden sind, dass sie unter den möglichen Bedingungen im Endlager langfristig stabil sind und dass „gealterte“ Materialien immer noch ausreichende Verschlusseigenschaften aufweisen. Außerdem können durch geometrische Überdimensionierung (Opferschicht) Alterungsprozesse sowie Materialabtrag berücksichtigt werden. Diese wird so bemessen, dass es zu keiner Zeit innerhalb der Funktionsdauer zu einer Herabsetzung der auslegungsrelevanten Materialeigenschaften bzw. erforderlichen Bauteilabmessungen kommen kann.

50.3 Sachlage am Standort

Die Planung der Komponenten der Streckenverschlüsse berücksichtigt die Materialalterung sowie thermomechanische, hydraulische und chemische Einwirkungen auf die Barrieren, die während der zukünftigen Entwicklung erwartet werden (Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011a, Müller-Hoeppe 2011b). Prinzipiell kommen folgende Schadensmechanismen in Frage, die zu einem vorzeitigen Versagen des Streckenverschlusses beitragen können:

Erdbeben: Bei einem Erdbeben hoher Intensität kann es ggf. durch Änderungen der Spannungsrandbedingungen zu dynamischen Entlastungen im Konturbereich kommen. Dadurch können Risse an der Kontur Gebirge/Barriere und in der Auflockerungszone aufreißen.

Diapirismus: Durch Salzverschiebungen (Diapirismus) kann es zu Lageverschiebungen kommen und Konturabrisse an der Streckenkantur resultieren.

Chemische Einwirkungen: das geochemische Milieu entwickelt sich in anderer Weise als prognostiziert mit der Folge, dass der Beton korrodiert und sich die hydraulische Leitfähigkeit erhöht,

Mechanische, thermische und hydraulische Einwirkungen:

- anisotrope Spannungsverhältnisse im Gebirge, z. B. durch ungleichmäßigen Wärmeeintrag infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle, kann zu Lageverschiebungen oder Rissbildungen im Baustoff, in der Kontaktzone Gebirge / Barriere, in der Auflockerungszone und/oder im Gebirge kommen. Daraus kann eine Umströmung des Streckenverschlusses resultieren.
- Die Streckenverschlüsse können durch Lösungen aus dem Infrastrukturbereich (Zutritte über die Schächte und Zutritte aus dem Wirtsgestein) sowie Lösungen, die aus dem feuchten Salzgrus ausgepresst werden, angeströmt werden. Falls es dabei zu Überschreitungen des bei der Auslegung zu Grunde gelegten Fluiddrucks kommt, kann es zu Lageverschiebungen oder Rissbildungen im Baustoff, in der Kontaktzone Gebirge/Barriere, in der Auflockerungszone und/oder im Gebirge kommen.

- Eine intensive Gasbildung während der Nachverschlussphase, die zu einem Überdruck führt, kann zum Aufreißen von Rissen am Kontakt Gebirge/Barriere oder in der Auflockerungszone führen.

Kanalisation im Dichtelement: falls es bei der Errichtung zur Kanalisation im Baukörper gekommen ist, so kann sich ein Strömungskanal mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ausbilden.

Die Streckenverschlüsse bestehen aus jeweils zwei Dichtelementen und drei Widerlagern, so dass eine Redundanz gegeben ist. Beim Integritätsnachweis werden aber nicht die Einzelemente, sondern die Barriere als Komplettbauwerk betrachtet.

Aus den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Baumaterialien und des Gebirges resultieren thermomechanische Zugspannungen, die bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt wurden. Das Quellen des vorgesehenen Baumaterials (Sorbeton A1) bei einer Durchströmung mit Lösungen wird ebenfalls berücksichtigt.

Weitere Lastannahmen für die Bauwerksauslegung ergeben sich aus dem Gebirgsdruck und dem Fluidruck. Die Streckenverschlüsse werden so bemessen, dass der Gebirgsdruck aus der Konvergenz aufgenommen werden kann. Der daraus resultierende Stützdruck oder/und der Quelldruck des Baustoffs führen in der Kontaktzone zwischen Barriere und Gebirge sowie in der Auflockerungszone an der Hohlraumkontur zu einer Abdichtung. Bei einwirkendem Fluidruck aus Zuflüssen in die Strecken oder aus der Gasbildung in den Einlagerungsbereichen dürfen die verschlossenen Wegsamkeiten an der Kontaktzone und der Auflockerungszone nicht aufreißen, da es sonst zu einer Umströmung des Streckenverschlusses kommt und damit die Barrierenfunktion verloren geht.

Die Baumaterialien wurden entsprechend den aktuellen hydrochemischen Verhältnissen und unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger Entwicklungen (Zutritt alterierter Lösungen aus dem Infrastrukturbereich) ausgewählt. Die auf die Bauwerke einwirkenden Beanspruchungen sowie die Alterungsprozesse der Baustoffe werden soweit bekannt in der Auslegung berücksichtigt.

50.4 Standortspezifische Auswirkungen

Ein Versagen eines Streckenverschlusses führt zum Verlust der Funktionsfähigkeit der betroffenen Barriere und könnte – falls sich Lösungen im Infrastrukturbereich befinden – zum Vordringen von Lösungen zu den Abfällen bzw. zur Freisetzung kontaminierter Lösungen und Gase aus den Einlagerungsbereichen in den Infrastrukturbereich führen. Aufgrund der entsprechenden Auslegung der Bauwerke (Redundanz) und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Errichtung ist ein derartiges Versagen aber nicht wahrscheinlich. Bei demonstriertem Nachweis der funktionalen Unabhängigkeit der beiden Dichtelemente ist ihr gleichzeitiges Versagen auszuschließen. Da dieser Nachweis bislang noch nicht geführt wurde, wird an dieser Stelle das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses, das heißt das gleichzeitige Versagen beider Dichtelemente als „weniger wahrscheinlich“ unterstellt.

50.5 Zeitliche Beschränkung

Ein mögliches Versagen der Barrieren ist nur während der geplanten Funktionsdauer des Streckenverschlusses (50.000 Jahre) sicherheitstechnisch relevant.

50.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit:

[] wahrscheinlich, [X] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

50.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

50.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Streckenverschlüsse

50.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Bei demonstriertem Nachweis der funktionalen Unabhängigkeit der beiden Dichtelemente ist ihr gleichzeitiges Versagen auszuschließen. Da dieser Nachweis bislang noch nicht geführt wurde, ist eine Zuordnung zur Wahrscheinlichkeitsklasse „nicht zu betrachten“ nicht zulässig. Eine Zuordnung zur Wahrscheinlichkeitsklasse „wahrscheinlich“ kann auf Grund des gewählten Streckenverschlusskonzeptes und der durchzuführenden QS-Maßnahmen ausgeschlossen werden. Daher wird an dieser Stelle das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses, das heißt das gleichzeitige Versagen beider Dichtelemente als „weniger wahrscheinlich“ unterstellt.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Ein vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses beeinträchtigt die Funktion der Initial-Barriere "Streckenverschlüsse".

Wirkung in den Teilsystemen: Die Streckenverschlüsse werden im Grubengebäude angeordnet und sind daher am Teilsystem "Strecken und Schächte" zu zuordnen.

50.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben

Diapirismus

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Fluiddruck

Kanalisation in Dichtelementen

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Erdbeben: durch ein Erdbeben können sich die Spannungsrandbedingungen im Gebirge ändern. In der Folge können Risse in der Kontaktzone Gebirge/Barriere und der Auflockerungszone aufreißen.

Diapirismus: durch Salzbewegungen können sich die Elemente der Barriere gegeneinander verschieben.

Streckenverschlüsse: Die Auslegung der Streckenverschlüsse bestimmt maßgeblich, ob es zu einem vorzeitigen Versagen eines Streckenverschlusses kommen kann.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Falls die zukünftigen Umweltbedingungen von der prognostizierten Entwicklung abweichen, kann es zur Alteration der Streckenverschlüsse kommen. Hieraus kann bei entsprechender Intensität der Alteration ein vorzeitiges Versagen der Streckenverschlüsse resultieren.

Fluiddruck: Falls der Fluiddruck, die bei der Auslegung zugrunde gelegte Intensität überschreitet, kann es zum vorzeitigen Versagen des Streckenverschlusses kommen.

Kanalisation in Dichtelementen: Eine Kanalisation in Dichtelementen kann bei entsprechender Ausprägung zu einem vorzeitigen Versagen der Verschlüsse führen.

Auflockerungszone: Die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone ist entscheidend für die Funktion der Verschlüsse. Falls sich die Auflockerungszone im Bereich eines Verschlusses nicht in der vorgesehenen Weise schließt, kann es zu Umläufigkeiten und zum vorzeitigen Versagen des Verschlusses kommen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Falls die Spannungsverhältnisse im Gebirge von den bei der Auslegung unterstellten Verhältnissen abweichen, kann es zum vorzeitigen Versagen eines Streckenverschlusses kommen.

Bemerkungen:

Verschlussmaterial: Die verwendeten Verschlussmaterialien beeinflussen das mögliche Versagen der Verschlussbauwerke.

Geochemisches Milieu: Das geochemische Milieu wirkt nicht unmittelbar auf die Streckenverschlüsse, sondern über die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Porosität

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Streckenverschlüsse: Durch das vorzeitige Versagen werden die Eigenschaften der Streckenverschlüsse verändert.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Die erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten infolge eines Versagens eines Streckenverschlusses können zu einer verstärkten Alteration der Verschlüsse führen.

Porosität: Bei einem Versagen verfügt ein Streckenverschluss über eine erhöhte Porosität.

Strömungsvorgängen im Grubengebäude: Bei einem vorzeitigen Versagen eines Streckenverschlusses kann es zu Strömungsvorgängen im Grubengebäude kommen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Wenn nach einem Versagen der Verschlüsse die mechanische Stabilität der Barrieren beeinträchtigt ist, wird der Stützdruck, den die Barriere auf das Gebirge ausübt, erniedrigt, so dass im Gebirge Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen stattfinden.

50.11 Offene Fragen

- Versagensmechanismen
- mathematische Beschreibbarkeit der Auflockerungszone
- Quantifizierung der Parameter Permeabilität und Porosität in einer Auflockerungszone in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad

50.12 Literaturquellen

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Lux, K.-H., Eberth, S., Düsterloh, U. (2006): Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barrierenintegritäts- und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien mit besonderer Berücksichtigung der Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie. - Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 02C0720. Professur für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal; Clausthal-Zellerfeld.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N. (2011a): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N. (2011b): Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse - Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und A). Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M. (2012a): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren –Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2002): Closure Concept for the Morsleben LLW Repository for Radioactive Waste. Design of the Drift Seals in a former Salt Mine. - Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case. Workshop Proceedings; Oxford, UK.

Müller-Hoeppe, N., Mauke, R., Wollrath, J. (2003): Repository Seal Requirements and Design. - EBS-Design Requirements and Constraints. Workshop; Turku, Finland.

51 Lageverschiebung des Schachtverschlusses (2.1.07.07)

51.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Änderung des Schachtverschlusses oder einzelner Elemente desselben gegenüber der Einbauposition.

51.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der Schachtverschluss ist ein Bauwerk, welches sich aus Dichtelementen und Widerlagern zusammensetzt. Damit die Dichtelemente als Dichtungen wirksam sein können, dürfen sie bei angreifendem Fluiddruck von oben oder von unten nicht aus ihrer Position verschoben werden, da ansonsten Abrisse von der umliegenden Gebirgskontur und damit Umläufigkeiten zu besorgen wären. Daher werden die Dichtelemente durch Widerlager in ihrer Position fixiert.

Mögliche Ursachen für Lageverschiebungen sind der Diapirismus, Auslaugungen des Gebirges im Bereich des Schachtverschlusses sowie thermomechanische oder hydraulische Beanspruchungen der Dichtelemente, die die Stabilität der Widerlager überschreiten. Als Folge der Verschiebung des Schachtverschlusses kann es zu Abrissen von der Kontur der Schachtwandung kommen.

Ein Forschungsvorhaben am Schacht Salzdetfurth hat ergeben, dass Schottersäulen als Widerlager für Dichtelemente in Schachtverschlüssen unter den Versuchsrandbedingungen langfristig setzungsstabil sind und für diese Aufgabe geeignet sind (Kali + Salz 2002). Der Beleg für die Langzeitstabilität der Schottersäulen ergibt sich aus natürlichen Analoga und chemischen Untersuchungen.

51.3 Sachlage am Standort

Am Standort Gorleben sind für den Schachtverschluss unten Widerlager aus Sorelbe-
ton und Salzbeton und oben setzungsstabile Schottersäulen aus Basalt oder Serpen-
tinit vorgesehen. Durch die entsprechende Ausführung der Schottersäule und der an-
deren Widerlager werden die Dichtelemente gegen Fluiddrucke von unten oder oben

lagestabil in ihren Positionen gehalten. Leichte Lageverschiebungen beeinträchtigen noch nicht die Dichtfunktion.

Durch Salzbewegungen infolge des Diapirismus kommt es zu strukturellen Veränderungen im Schachtbereich, die zu Lageverschiebungen des Schachtverschlusses führen werden.

Außerdem ist nicht auszuschließen, dass es bei einem Lösungszutritt zu Auslaugungen im Salzgebirge kommt. In der Folge könnten die Widerlager in ihrer Funktion beeinträchtigt werden und daraus Lageverschiebungen eines Dichtelementes resultieren.

Durch Betonwiderlager werden die oberen Dichtelemente von der Schottersäule entkoppelt. Es ist zu zeigen, dass durch diese konstruktive Maßnahme Lageverschiebungen des Schachtverschlusses durch ein frühes Erdbeben verhindert werden.

51.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die aktuelle Intensität der Salzbewegungen durch Diapirismus beträgt ca. 0,02 mm/Jahr am Salzspiegel (Mrugalla 2011). Daher kann es in dem für die Barrieren relevanten Zeitraum von 50.000 Jahren zu einer Lageverschiebung der Schachtverschlüsse von 1 m kommen. Der Schachtverschluss wird so ausgelegt, dass es auch bei asymmetrischen Verschiebungen (aufgrund der unterschiedlichen Kriechklassen der verschiedenen Salzgesteine) in dieser Größenordnung nicht zu einem Ausfall aller drei Dichtelemente kommen wird. Der Auslegung wird die Aufheizung des Gebirges durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle zugrunde gelegt, die zu stärkeren Hebungen führen wird (Kock et al. al. 2012).

Bei einem Zutritt von ungesättigten Deckgebirgslösungen kann es durch Auslaugungen des Gebirges zu Lageverschiebungen einzelner Schachtverschlusselemente kommen.

51.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Der Schachtverschluss muss über die geplante Funktionsdauer (< 50.000 Jahre) relativ zum umgebenden Salzgebirge lagestabil sein.

51.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

51.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

51.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschluss

51.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Durch den andauernden Diapirismus des Salzstocks Gorleben, wird es zu einer Lageverschiebung der Schachtverschlüsse. Eine Lageverschiebung der Schächte wird daher "wahrscheinlich" stattfinden.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das FEP hat eine direkte Einwirkung auf die Funktion der Initial-Barriere "Schachtverschlüsse"

Wirkung in den Teilsystemen: Der Schachtverschluss ist in einem Schacht angeordnet und daher dem entsprechenden Teilsystem zuzuordnen.

51.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Diapirismus

Thermische Expansion oder Kontraktion

Begründungen:

Diapirismus: Aus den Salzbewegungen infolge des Diapirismus resultieren Lageverschiebungen des Schachtverschlusses.

Thermische Expansion und Kontraktion: Durch die Erwärmung des Gebirges infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kommt es zur Expansion und zur Lageverschiebung der Schachtverschlüsse.

Beeinflussende FEP:

Erdbeben

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Fluiddruck

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Quellen des Bentonits

Auflösung und Ausfällung

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Erdbeben: Durch Betonwiderlager werden die oberen Dichtelemente von der Schotter säule entkoppelt. Es ist zu zeigen, dass durch diese konstruktive Maßnahme Lageverschiebungen des Schachtverschlusses verhindert werden.

Verschlußmaterial, Schachtverschlüsse: Das für die Schottersäule und die Widerlager verwendete Verschlussmaterial und das Barrierendesign sind entscheidend für die Langzeitstabilität und die Funktionalität des Schachtverschlusses.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Infolge einer Alteration des Schachtverschlusses kann es zu Sackungen und zu einer Lageverschiebung kommen.

Konvergenz, nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien, Quellen des Bentonits: Diese Prozesse führen zu einer Einspannung des Schachtverschlusses im Schacht und tragen damit zur Stabilität des Schachtverschlusses bei. Falls einer dieser Prozesse die vorgesehene Größenordnung überschreitet, kann es zu einer Lageverschiebung des Schachtverschlusses kommen.

Fluiddruck: Der Fluiddruck führt immer zu einer leichten Lageverschiebung zumindest des Bentonitdichtelementes, woraus aber keine Beeinträchtigung der Dichtfunktion resultiert.

Auflösung und Ausfällung: Bei einem Zutritt ungesättigter Deckgebirgslösungen kann es zu Auslaugungen im Salzgebirge sowie in den Betonelementen kommen. Hieraus könnten ein Absacken der Schottersäule und eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses resultieren.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Falls sich die Spannungsverhältnisse im Gebirge ändern (z. B. asymmetrische Spannungsverteilung) kann es zu Lageverschiebungen des Schachtverschlusses kommen.

Bemerkungen:

Erdbeben: Durch das Betonwiderlager unterhalb des oberen Dichtelementes kann es auch bei Setzungen in der Schottersäule durch ein Erdbeben nicht zu Lageverschiebungen des oberen Teils des Schachtverschlusses kommen.

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Ein Lösungszutritt ins Grubengebäude wirkt nur indirekt über die Auslaugung des Wirtsgesteins auf die Lageverschiebung der Schachtverschlüsse.

Wirtsgestein: Das Wirtsgestein bewirkt nicht direkt Lageverschiebungen des Schachtverschlusses sondern nur indirekt über den Diapirismus oder im Fall von Auslaugungen im Wirtsgestein.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Schachtverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Kanalisation in Dichtelementen

Quellen des Bentonits

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Schachtverschlüsse: Eine Lageverschiebung verändert die Eigenschaften der Schachtverschlüsse.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, nicht thermisch induzierte Volumenänderung, Quellen von Bentonit: Eine Lageverschiebung der Verschlüsse kann die Einspannung im Gebirge reduzieren und neue Wegsamkeiten schaffen. Infolge dessen können die genannten Prozesse beeinflusst werden.

Kanalisation in Dichtelementen: Bei stärkeren Lageverschiebungen der Dichtelemente können lokale Abrisse an der Hohlraumkontur zu Umläufigkeiten und damit zu lokalen Fließwegen (Kanalisation) führen.

Konvergenz, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Wenn infolge von Lageverschiebungen die Einspannung des Schachtverschlusses in der Schachtröhre beeinträchtigt ist, werden die Konvergenz und Spannungsverhältnisse im angrenzenden Gebirge beeinflusst.

Bemerkungen:

Lösungszutritte in das Grubengebäude: Zu Lösungszutritten in das Grubengebäude kommt es nur, wenn es infolge der Lageverschiebung zu einem Versagen des Schachtverschlusses kommt, d. h. es besteht nur eine indirekte Abhängigkeit.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Auch Strömungsvorgänge im Grubengebäude werden nur indirekt durch die Lageverschiebung beeinflusst, da zunächst der Schachtverschluss versagen und es dann zu einem Lösungszutritt kommen muss.

51.11 Offene Fragen

- Übertragbarkeit der Ergebnisse des FuE-Projektes Schachtverschluss Salzdetfurth auf die Randbedingungen eines Endlagerschachtverschlusses
- Ausbildung, Größe und Parametrisierung der Auflockerungszone

51.12 Literaturquellen

KALI + SALZ (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth, Schacht II. - BMBF-Forschungsvorhaben 02C0516, Kali + Salz AG; Kassel.

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P., (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine

52 Ausfall eines Dichtpfropfens (2.1.07.08)

52.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Ausfall eines Dichtpfropfens durch chemische, mechanische, hydraulische oder thermische Einwirkungen bzw. eine Kombination verschiedener Einwirkungen, die zu einem mindestens teilweisen Verlust der Dichtfunktion führen.

52.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Keine.

52.3 Sachlage am Standort

Das Endlagerverschlusskonzept für den Standort Gorleben sieht neben der Errichtung von Strecken- und Schachtverschlüssen den Bau von Dichtpfropfen aus Sorelbeton vor, um den feuchten Salzgrus in den Richtstrecken vom trockenen Salzgrus in den Einlagerungsfeldern zu trennen (Müller-Hoeppe et al. 2012).

Mögliche Ursachen für einen Ausfall eines Dichtpfropfens sind:

Erdbeben: Durch ein Erdbeben kann es zu geänderten Spannungsrandbedingungen im Gebirge und zum Aufreißen von Rissen am Kontakt Gebirge/Barriere und in der Auflockerungszone kommen.

Diapirismus: Durch Salzbewegungen (Diapirismus) kann es zu Konturabrissen und damit zum Ausfall der Dichtpfropfen kommen.

Chemische Einwirkungen:

- das geochemische Milieu entwickelt sich in anderer Weise als prognostiziert mit der Folge, dass der Sorelbeton korrodiert und sich die hydraulische Leitfähigkeit erhöht,
- durch das Quellen der Baustoffe infolge der thermochemischen Sulfatreduktion wird der Baukörper aufgelockert und die hydraulische Leitfähigkeit erhöht (ist durch Modellrechnungen zu prüfen)

Mechanische, hydraulische und thermische Einwirkungen:

- die Dichtpfropfen liegen in einem Bereich, der durch wärmeentwickelnde Abfälle erhitzt wird. Falls die späteren thermomechanischen Zugspannungen von den Zugbeanspruchungen abweichen, die bei der Auslegung zugrunde gelegt wurden, können im Baustoff, in der Kontaktzone Gebirge/Barriere, in der Auflockerungszone und/oder im Gebirge Risse aufreißen, die zu einer Durch- und Umströmung des Dichtpfropfens führen können.
- Fluiddruck: eine intensive Gasbildung, die zu einem Überdruck führt, der die Auslegung der Barriere überschreitet

Kanalisierung im Dichtelement: falls es bei der Errichtung zur Kanalisierung im Baukörper gekommen ist, so kann sich ein Strömungskanal mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ausbilden.

52.4 Standortspezifische Auswirkungen

Ein Ausfall eines Dichtpfropfens führt zu einer erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit und könnte zum Vordringen von Lösungen zu den Abfällen bzw. zur Freisetzung kontaminierter Lösungen und Gase führen.

52.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

52.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

52.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

52.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

52.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: An die Funktionsdauer der Dichtpfropfen bestehen keine Anforderungen. Ihr Ausfall ist daher wahrscheinlich.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die Dichtpfropfen sind keine Initial-Barrieren.

Wirkung in den Teilsystemen: Die Dichtpfropfen schließen die Einlagerungsstrecken gegen das restliche Grubengebäude ab und sind daher dem Teilsystem "Strecken und Schächte" zu zuordnen.

52.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben

Diapirismus

Sonstige Verschlussbauwerke

Fluiddruck

Kanalisation in Dichtelementen

Auflösung und Ausfällung

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Erdbeben: Durch ein Erdbeben können Spannungen im Dichtpfropfen, an der Kontaktzone Gebirge/Barriere und in der Auflockerungszone auftreten und infolge dessen Risse aufreißen.

Diapirismus: Durch Salzbewegungen kann der Dichtpfropfen verschoben werden. Je nach der Intensität dieser Bewegungen kann die Funktion des Dichtpfropfens beeinträchtigt werden.

Sonstige Verschlussbauwerke: Die Eigenschaften der Dichtpfropfen bestimmen, ob bzw. wann es zu einem Ausfall eines Dichtpfropfens kommen kann.

Auflösung und Ausfällung, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Falls das zukünftige geochemische Milieu von der prognostizierten Entwicklung abweicht, kann es zur Auflösung und Ausfällung sowie zur Korrosion der Baustoffe kommen. Hieraus kann bei entsprechender Intensität der Korrosion ein Ausfall der Dichtpfropfen resultieren.

Fluiddruck: Falls der Fluiddruck die bei der Auslegung zugrunde gelegte Intensität überschreitet, kann es zum Ausfall des Dichtpfropfens kommen.

Kanalisation in Dichtelementen: Eine Kanalisation in Dichtelementen kann bei entsprechender Ausprägung zu einem Ausfall der Dichtpfropfen führen.

Auflockerungszone: Die hydraulische Leitfähigkeit der Auflockerungszone ist entscheidend für die Funktion der Dichtpfropfen. Falls sich die Auflockerungszone im Bereich eines Dichtpfropfens nicht in der vorgesehenen Weise schließt, kann es zu Umläufigkeiten und zum Ausfall des Dichtpfropfens kommen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Falls die Spannungsverhältnisse im Gebirge von den bei der Auslegung unterstellten Verhältnissen abweichen, kann es zum Ausfall eines Dichtpfropfens kommen.

Thermochemische Sulfatreduktion: Falls es zu einer thermochemischen Sulfatreduktion und einem entsprechenden Aufquellen des Baustoffs kommt, so kann der Baustoff aufgelockert und die hydraulische Leitfähigkeit erhöht werden.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Sonstige Verschlussbauwerke

Porosität

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Sonstige Verschlussbauwerke: Durch den Ausfall werden die Eigenschaften des Dichtpfropfens verändert.

Porosität: Bei einem Ausfall verfügt ein Dichtpfropfen über eine erhöhte Porosität.

Strömungsprozesse im Grubengebäude: Durch den Ausfall eines Dichtpfropfens können Strömungsprozesse im Grubengebäude beeinflusst werden.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Wenn nach einem Ausfall eines Dichtpfropfens die mechanische Stabilität der Pfropfen beeinträchtigt ist, wird der Stützdruck, den die Pfropfen auf das Gebirge ausübt, erniedrigt, so dass im Gebirge Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen stattfinden.

52.11 Offene Fragen

Relevanz der thermochemischen Sulfatreduktion

52.12 Literaturquellen

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin

Engelhardt, H.H., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

53 Porosität (2.1.08.01)

53.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Porosität ist definiert durch das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu gesamtem geometrischen (Außen-) Volumen.

53.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Porosität ist zu unterscheiden von der Porenzahl, die das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Feststoffvolumen angibt. Die (Gesamt-)Porosität besteht aus einem von außen zugänglichen Porenraum und geschlossenen Poren. Die Gesamtporosität und der Anteil des Luft- bzw. Lösungserfüllten Porenraums von geologischen und technischen Materialien werden üblicherweise als Pyknometer-Porosität aus den Wertepaaren Korndichte/Gesteinsdichte getrockneter Proben bzw. Korndichte/Gesteinsdichte natürlich feuchter Proben berechnet (z. B. Nagra 2002).

Entscheidend für den Stofftransport durch ein poröses Medium ist die effektive Porosität, die von dem durchgängigen, vernetzten Porensystem innerhalb des Mediums gebildet wird. Die effektive Porosität wird auch als durchfluss- bzw. für Advektion wirksame Porosität bezeichnet. Ähnlich wird für Diffusionsprozesse ebenfalls eine effektive Porosität definiert. Neben der effektiven Porosität gibt es immer einen Porenanteil, der nicht an das Porensystem angeschlossen ist; dieser Anteil ist abhängig von der Struktur des Mediums. Die effektive Porosität ist somit kleiner oder gleich der Gesamtporosität.

Für Strömungs- und Transportprozesse ist die effektive Porosität relevant, für Kompaktionsvorgänge muss die gesamte Porosität berücksichtigt werden.

53.3 Sachlage am Standort

Es wird zwischen den Porositäten der unterschiedlichen Verfüllungen der Grubenbaue und der geologischen Formationen des Endlagersystems unterschieden: Durch die Konvergenz des Grubengebäudes im Salzgebirge nimmt der Hohlraumanteil der Verfüllungen, z. B. von Salzgrusversatz stetig ab (vgl. FEP Salzgruskompaktion), während

sich die Porositäten im Deckgebirge erst in geologischen Zeiträumen ändern können (z. B. Klinge et al. 2007).

- Teilkomponenten für Verschlüsse aus vorkompaktiertem Salzgrus oder ähnlich kompaktierbarem Material verhalten sich wie Salzgrus-Verfüllungen. Sie werden durch Konvergenz kompaktiert (vgl. FEP Salzgruskompaktion). Die unterschiedlichen Verschlussmaterialien (ohne Salzgrus) sowie ihre Eigenschaften werden im FEP Verschlussmaterial beschrieben. Parameterspezifikationen finden sich in Engelhardt et al. (2011) und Müller-Hoeppe (2011).
- Gering kompaktierbare Materialien (z. B. Schotter in Schachtverschlusssystemen) behalten ihre Porosität über lange Zeiträume. Die mittlere Porosität im Schotter beträgt 0,38 (Müller-Hoeppe 2012).
- Offene Hohl- und Porenräume im Abfall werden gebindespezifisch zu einer mittleren effektiven Porosität zusammengefasst. Die Feststoffe des Abfalls, d. h. Glas, Metalle und die Brennstoffmatrix, sind je nach Konsistenz unterschiedlich kompaktierbar, wobei die Ausgangsporosität in den Abfallgebinden durch Vorkompaktion weitgehend minimiert ist. Eine Reduktion des Resthohlraumes ist durch Eindringen von Salzgestein oder Salzgrus in die offenen Hohlräume möglich.
- Die Anfangsporositäten der eingebrachten Salzgrus-Verfüllung liegen in Abhängigkeit vom Versatzverfahren bei ca. 0,3 bis 0,4. Im Bereich der Schächte wird der Salzgrus bis auf etwa 10 bis 12 % dynamisch vorverdichtet (vgl. FEP Salzgruskompaktion).
- Im Wirtsgestein (Hauptsalz) sind keine effektiven Porositäten außerhalb von Gas- und Lösungsvorkommen zu erwarten (FEP Wirtsgestein bzw. Bornemann et al. 2008).
- Das Verhalten der Auflockerungszone um Grubenbaue mit einer Porosität ist im FEP Auflockerungszone beschrieben.
- Im Deckgebirge variieren die effektiven Porositäten je nach geologischer Einheit beträchtlich (z. B. Klinge et al. 2007).

53.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Bei den schlecht kompaktierbaren Materialien (z. B. Schottersäulen von Schachtverschlüssen, Streckenabdichtungen sowie den Schotterverfüllungen im Infrastrukturbe-

reich) ändert sich die Porosität zeitlich wenig oder gar nicht. Bei den kompaktierbaren Materialien, vor allem dem Salzgrusversatz, ändert sich die Porosität durch Kompaktion auf Grund der Konvergenz und hat somit Einfluss auf die Lösungs- und Gasvolumina im Endlagersystem (vgl. FEP Salzgruskompaktion).

Die zeitliche Änderung der Salzgrusporosität ist bei der Bewertung von Strömungs- und Transportprozessen im Endlager zu berücksichtigen. Allerdings hängt der Prozess der Salzgruskompaktion stark von den Randbedingungen (z. B. Temperatur, Versatzdruck) sowie den Materialspezifikationen (z. B. Feuchtegehalt, Korngrößenspektrum) ab.

Die Porosität beeinflusst viele Transportprozesse: Sie ist unter anderem mit der Permeabilität verknüpft, so dass die Porosität indirekt auf advective Strömungsprozesse einwirkt (Müller-Lyda et al. 1999). Die Geometrie des Porenraums verursacht zudem eine mechanische Dispersion.

53.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

53.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

53.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

53.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

53.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Randbedingung, daher gewiss.

Wirkung in den Teilsystemen: Alle Materialien besitzen eine (unterschiedlich große) Porosität. Sie ist somit eine (zeitlich veränderliche) Randbedingung und in allen vier Teilsystemen zu berücksichtigen.

Einwirkung auf Initial-Barrieren: Das FEP wirkt über mehrere andere FEP auf die Initial-Barrieren. Eine Einwirkung über mehrere FEP wird als "nicht zutreffend" eingestuft.

53.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Diagenese

Permafrost

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Salzgruskompaktion

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Kanalisation in Dichtelementen

Quellen des Bentonits

Auflösung und Ausfällung

Thermische Expansion oder Kontraktion

Auflockerungszone

Begründungen:

Diagenese: Die Porosität des Deck- und Nebengebirge kann sich in geologischen Zeiträumen durch diagenetische Prozesse (Gesteinsverfestigung) verringern.

Permafrost: Durch Gefrier- oder Tauprozesse im Porenraum von wasserführenden Gesteinen ändert sich der effektive Porenraum (Porosität) der für Fließ- oder Speichervorgänge zur Verfügung steht.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Durch geochemische Prozesse kann sich zeitabhängig ihre Porosität ändern.

Konvergenz: Durch die Konvergenz der Grubenbaue wird die Porosität, z. B. der Versatzmaterialien, reduziert.

Salzgruskompaktion: Durch die Kompaktion des Versatzes (Salzgrus) wird seine Porosität verringert.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Die Porosität des Materials wird durch diesen Prozess verändert, z. B. das Quellen von Bentonit oder Beton führt zu einer Reduzierung der Porosität.

Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses oder Dichtpfropfen. Das Versagen dieser Verschlüsse ist mit einer Erhöhung ihrer Porosität verbunden.

Kanalisation in Dichtelementen: Auch eine Kanalisation der Strömung in Dichtelementen ist dort mit einer Lokalisierung der Porosität verbunden.

Quellen des Bentonits: Das Quellen von Bentonit führt zu einer Reduzierung der Porosität.

Auflösung und Ausfällung: Beide Prozesse führen, wenn sie im Porenraum stattfinden, zu einer Änderung seiner Größe und Konfiguration.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Materialvolumenänderungen (z. B. Ausdehnung von Salzgruskörnern) können sich unmittelbar auf die Porosität durchpausen.

Auflockerungszone: Die Ausbildung und Entwicklung einer Auflockerungszone ist immer mit dem Entstehen bzw. der Änderung ihrer Porosität (Dilatanz) verbunden.

Bemerkungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Durch einen Lösungszutritt ins Grubengebäude wird die Porosität vor allem durch Auflösungsprozesse vergrößert (indirekter Einfluss)

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Permeabilität

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Gaseindringdruck

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Mechanische Dispersion

Diffusion

Matrixdiffusion

Begründungen:

Permeabilität: Die Permeabilität wird im Wesentlichen durch die Größe und Verteilung der Porosität bestimmt.

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Die Porosität und ihre Verteilung beeinflusste Möglichkeit und Ablauf eines Lösungszutritts ins Grubengebäude.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Porosität und ihre Verteilung im Versatz und den Verschlüssen beeinflusste die Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

Gaseindringdruck: Der Gaseindringdruck wird wesentlich durch die Größe und Verteilung der Porosität bestimmt.

Grundwasserströmung in Deck- und Nebengebirge: Ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Grundwasserströmung ist die Größe und Verteilung der Porosität.

Gasströmung in Deck- und Nebengebirge: Ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Gasströmung ist die Größe und Verteilung der Porosität.

Diffusion: Die Diffusion in allen vier Teilbereichen wird wesentlich durch die dort vorliegende Porosität bestimmt.

Matrixdiffusion: Die Matrixdiffusion, d. h. der diffusive Übergang von gelösten Stoffen aus Bereichen, in denen advektiver Transport dominiert, in eine Matrix mit immobilen Porenwässern, wird wesentlich durch die Verteilung der Porosität bestimmt.

Mechanische Dispersion: Die mechanische Dispersion in allen vier Teilbereichen wird wesentlich durch die dort vorliegende Porosität bestimmt.

53.11 Offene Fragen

- Zeitliche Entwicklung der Porosität bei sehr kleinen Werten (siehe FEP Salzgruskompaktion)
- Auswirkung einer eventuell möglichen Erhöhung der Porositäten durch Überdrücke aus Gasbildungsprozessen (s. FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein).

53.12 Literaturquellen

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichteelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil 1 -

Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. -Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 71: 145 S.; Hannover.

Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Lyda, I., Birthler, H., Fein, E. (1999): Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148; Braunschweig.

Nagra (2002): Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technical Report NTB 02-03, Nagra; Wetingen, Switzerland.

54 Permeabilität (2.1.08.02)

54.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Permeabilität ist eine Kenngröße für die Durchströmbarkeit eines porösen (oder geklüfteten) Mediums. Eine geringe Permeabilität ist gleichbedeutend mit einem hohen Strömungswiderstand und bewirkt damit eine langsame Durchströmung.

54.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Permeabilität ist aus dem Gesetz nach Darcy abgeleitet und gilt (streng genommen) für Einphasenfluss. Das Darcy-Gesetz (auch Darcy-Gleichung genannt) besagt, dass die Fluidmenge Q , die eine Fläche A in einem porösen Medium (zum Beispiel Salzgrus) (laminar) durchströmt, direkt proportional zum hydraulischen Gradienten i ist. Der Proportionalitätsfaktor dieser Beziehung, der k_f -Wert (Durchlässigkeitsbeiwert) ist ein Kennwert für das poröse Medium und das durchströmende Fluid (Flüssigkeit oder Gas). Durch Normierung über die dynamische Viskosität des Fluids ergibt sich die Permeabilität K als ein vom durchströmenden Medium unabhängiger Kennwert.

Die Permeabilität ist eine Kenngröße von Locker- und Festgesteinen. Sie resultiert primär aus der vorhandenen Porosität und hängt maßgeblich von der mikroskopischen Verteilung und der dreidimensionalen Vernetzungsstruktur des Porenraums ab (effektiver Porenraum), der sich in Abhängigkeit der Randbedingungen z. B. bei einer Schädigung oder Kompaktion ändert. Der Begriff sollte nicht für Stoffe verwendet werden, die so gering durchlässig sind, dass eine Strömung stattfindet, die nicht mehr dem Darcy-Gesetz folgt (Nicht-Linearität). Dies wird allgemein auch für unverritztes Steinsalz vermutet, allerdings zeigen experimentelle Ergebnisse, dass die Annahme von Darcy-Verhalten z. B. für die Ausbreitung von Gasen auch im Steinsalz eingeschränkt gültig ist (Popp et al. 2007).

Aufgrund von der Abhängigkeit der Permeabilität von der Porosität wird die Permeabilität von Salzgrus oder aufgelockertem Steinsalz in Modellrechnungen in der Regel über Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen beschrieben (Müller-Lyda et al. 1999). Allerdings gibt es aufgrund der Komplexität der lithologischen Randbedingungen (z. B. Porenraumverteilung und Vernetzung) keine universelle

Permeabilitäts/Porositäts-Beziehung. Hinzu kommt, dass z. B. die Beziehungen für eine Permeabilitätszunahme infolge Schädigung oder Abnahme bei Rekompaktion von aufgelockertem Material unterschiedlich sind, d. h. das jeweils die Belastungswege berücksichtigt werden müssen (z. B. Popp et al. 2007).

Unabhängig von den vielfältigen Randbedingungen und Einflussgrößen resultieren Permeabilitätsänderungen primär aus Änderungen der (effektiven) Porosität, so dass diese Wechselwirkungen mittelbar über eine Permeabilitäts-/Porositäts-Beziehung beschrieben werden und daher nicht bei den beeinflussenden FEP zusätzlich aufgeführt sind (siehe FEP Porosität).

Für Ausbreitungsrechnungen z. B. für Grundwasserströmungsberechnungen in der Geosphäre oder im Nahfeld eines Einlagerungshohlraumes werden die Permeabilitäten direkt aus Labormessungen oder in-situ-Messungen (Pumpversuche usw.) ermittelt. Dabei gilt die Einschränkung, dass die Permeabilität insbesondere im Feldversuch nicht direkt messbar ist, sondern nur unter Annahme z. B. geometrischer Randbedingungen für die Fluidausbreitung oder der Porosität aus Messparametern (z. B. gemessene Druckabfallkurven) abgeleitet wird. Gekoppelte Kennwerte zur Permeabilität und Porosität von un- bzw. geschädigtem Steinsalz sowie Salzgrusversatz liegen aus Labormessungen vor, in denen ein relevantes Belastungsspektrum simuliert würde (Müller-Lyda et al. 1999, Popp et al. 2007).

54.3 Sachlage am Standort

Die einzelnen Bereiche des Endlagersystems haben unterschiedliche Permeabilitäten:

- für nicht kompaktierbare Bereiche (z. B. Schottersäulen von Schachtverschlüssen) ist von einer nahezu konstanten Permeabilität während der ihnen zugrunde gelegten Funktionsdauer auszugehen,
- für kompaktierbare Bereiche (z. B. Salzgrusversatz, Sorelbeton, Bentonitdichtelemente) nimmt die Permeabilität durch Kompaktion im Laufe der Zeit ab, d. h. diese Bereiche werden undurchlässiger (siehe detaillierte Beschreibung in den FEP Porosität und Salzgruskompaktion sowie Versatz).

Parameterangaben zu den verschiedenen Versatz- und Dichtmaterialien finden sich bei Engelhardt et al. (2011) und Müller-Hoeppe (2011).

- In der Auflockerungszone liegt infolge von Spannungumlagerungen und der damit verbundenen Schädigung (abhängig u. a. von der Standzeit und Hohlraumgeometrie) eine gegenüber dem Wirtsgestein erhöhte Permeabilität vor. Sie nimmt infolge der Konvergenz-bedingten Spannungszunahme, z. B. im Bereich von Dichtbauwerken oder beim Aufkriechen auf den Versatz, infolge von Abdichtungs- und Verheilungsprozessen zeitlich ab.
- Die Dichtheit von Verschlussbauwerken wird über deren integrale Permeabilität beschrieben. Sie hängt neben den Eigenschaften der Dichtmaterialien vor allem von der Permeabilität in der Auflockerungszone bestimmt.

Das unverritzte Steinsalz ist im Gegensatz zu den aufgefahrenen Strecken und Schächten sowie aufgelockerten Bereichen des Salzgesteins hydraulisch dicht, d. h. die Permeabilität ist kleiner als $1\text{E-}22\text{ m}^2$. Bei erhöhten Gasdrücken können sich im dichten Steinsalz wiederverheilbare Wegsamkeiten bilden (Sekundärpermeabilität). Dadurch könne Gase entweichen, ohne das Steinsalz nachhaltig zu schädigen (Popp et al. 2007). Bei Auftreten spröder Gesteinseinheiten im Steinsalz können lokale Wegsamkeiten vorliegen (z. B. Anhydritschollen).

Die Durchlässigkeiten im Deckgebirge sind weitestgehend bekannt (Klinge et al. 2002) und können bis zur nächsten Kaltzeit als konstant angenommen werden.

54.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Die Undurchlässigkeit der Barriere Steinsalz sowie die Dichtheit der geotechnischen Barrieren (Strecken- und Schachtverschlüsse) ist essentiell für die Nachweisführung. Deshalb ist ihre Integrität im Langzeitnachweis unter der Einwirkung z. B. thermomechanischer Belastungen oder Erdbeben nachzuweisen.

Da das Steinsalz primär undurchlässig ist, bestimmen die Durchlässigkeiten der geotechnischen Barrieren und des Salzgrusversatzes maßgeblich die Strömungsprozesse im Grubengebäude. Diese können sich zeitabhängig ändern, z. B. infolge einer Salzgruskompaktion. Nicht bestimmungsgemäße hydraulische Eigenschaften einer Barriere können zum Eindringen größerer Lösungsmengen in das Grubengebäude führen. Darüber hinaus ist nachzuweisen, dass beispielsweise keine thermomechanischen Belastungen auftreten, die die Integrität der Steinsalzbarriere beeinflussen.

54.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

54.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

54.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

54.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

54.9 Begründungen:

Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Permeabilität ist eine (zeitlich veränderliche) Randbedingung.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die Permeabilität ist Stoffeigenschaft und stellt daher keine Beeinträchtigung der Initial-Barrieren dar.

Wirkung in den Teilsystemen: Die Permeabilität wird in allen vier Teilsystemen berücksichtigt. Das Wirtsgestein ist insgesamt hydraulisch undurchlässig, aufgelockerte Bereiche (im Nahfeld) oder sprödere Gesteinsschichten innerhalb des Wirtsgesteins können aber eine Permeabilität aufweisen (z. B. Anhydritschollen).

54.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Permafrost

Bildung kryogener Klüfte

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Porosität

Kanalisation im Salzgrus

Kanalisation in Dichtelementen

Auflockerungszone

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

In der Konsequenz der Abhängigkeit der Permeabilität von der Porosität gelten alle die Porosität beeinflussenden FEP auch für die Permeabilität, woraus eine integrale Permeabilitätsänderung resultiert. Hier sollten deshalb nur die FEP erwähnt werden, die ohne signifikante Porositätsänderungen, stattdessen z. B. durch Vernetzung lokaler Wegsamkeiten (sekundäre Permeabilität) zu lokalen Veränderungen der Permeabilität führen.

Permafrost: Gefrieren oder Tauen von im Porenraum von Gesteinen enthaltenen Wassers ändert dessen Durchlässigkeitseigenschaften (insbesondere Deckgebirge)

Bildung kryogener Klüfte: Thermisch induzierte Rissbildung, die auch das Wirtsgestein erfassen kann, bedingt eine Veränderung der Durchlässigkeit dieser Gesteinspartien.

Schacht-/Streckenverschlüsse, sonstige Verschlussbauwerke: Die technische Konzeption von Verschlussystemen bedingt deren Durchlässigkeitseigenschaften (hier: integrale Permeabilität).

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Verschlussmaterial: zeitlich bedingte Veränderungen der Verschlussbauwerke (z. B. Kontraktion von Verschlussmaterial) können lokale Wegsamkeiten (Umläufigkeiten) induzieren.

Porosität: Alle Änderungen in der Porosität pausen sich unmittelbar auf die integrale Permeabilität durch (abhängig von der Porenraumstruktur und Vernetzung)

Kanalisation im Salzgrus bzw. Dichtelementen: lokalisierter „fluid flow“ führt zu diskreten Wegsamkeiten, die eine integrale Permeabilität drastisch verändern können.

Auflockerungszone: gegenüber dem "dichten" Wirtsgestein Salz sind in der ALZ die Permeabilitäten erhöht und ändern sich in Abhängigkeit von der Entwicklung der ALZ.

Störungen im Wirtsgestein und im Deck- und Nebengebirge: Störungen stellen immer potentielle Wegsamkeiten bzw. mechanisch/hydraulische Schwächezonen dar, die die Permeabilität eines Homogenbereichs drastisch beeinflussen können.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Gaseindringdruck

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Der Lösungszutritt setzt eine lokal vorhandene Permeabilität voraus und wird von ihr abhängig variieren.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Ausbreitung von Fluiden im Grubengebäude hängt unmittelbar von der Permeabilität der verschiedenen Elemente (z. B. Versatz, Auflockerungszone) ab.

Gaseindringdruck: Der Gaseindringdruck hängt u. a. von der Öffnungsweite von Wegsamkeiten ab, die ebenfalls auch die Permeabilität bestimmt. Daraus folgt eine zumindest empirische Abhängigkeit des Gaseindringdrucks von der Permeabilität.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Grundwasserströmung in den verschiedenen Stockwerksbereichen des Deckgebirges hängt von den jeweiligen Gesteinspermeabilitäten ab.

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Gasströmung in der Geosphäre hängt von den jeweiligen Gesteinspermeabilitäten ab.

54.11 Offene Fragen

- Permeabilitätsbestimmungen für das Salzgebirge im Feldversuch hängen insbesondere von den Randbedingungen, d. h. dem Vorhandensein eines Porendruckes ab. In der Regel wird unterstellt, dass die Fluide im Gebirge drucklos sind, d. h. der Gradient für die Fluidausbreitung resultiert unmittelbar aus dem wirkenden Fluidruck. Messungen an der WIPP-Site (erhöhte Feuchtigkeitsgehalte!) weisen das Vorhandensein eines lithostatischen Fluiddruckes im Porenraum nach, was Konsequenzen für die Beschreibung der Fluidausbreitung ins Gebirge (z. B. Gasinfiltration) hätte. Dieser Sachverhalt ist standortspezifisch zu überprüfen.
- Während für geschädigtes Steinsalz bzw. für die Entwicklung der Permeabilität mit einsetzender Schädigung bei unterschiedlichen Spannungsrandbedingungen bereits Permeabilitäts-Porositätsbeziehungen existieren (z. B. Popp 2002), die allerdings bzgl. ihrer Anwendung noch überprüft werden müssen, fehlen belastbare
- Permeabilitäts-Porositäts-Beziehungen für den inversen Prozess der Verheilung von Schädigung (z. B. in der Auflockerungszone).
- Die Permeabilität ist eine anisotrope Kenngröße und hängt vor allem von der Geometrie des lokalen Spannungsfeldes ab. Mit Ausnahme von Labormessungen gibt es, insbesondere für Feldmessungen, z. B. in der ALZ, kein Verfahren die Permeabilität richtungsabhängig zu bestimmen.

54.12 Literaturquellen

Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Klinge, H., Boehme, J., Grisseman, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil 1 - Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. -Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 71: 145 S., Hannover.

Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Lyda, I., Birthler, H., Fein, E. (1999): Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148; Braunschweig.

Popp, T., Wiedemann, M., Böhnelt, H., Minkley, W. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Abschlussbericht Forschungsvorhaben SR 2470, Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter.

Popp, T. (2002): Transporteigenschaften von Steinsalz. *Meyniana*. 54: 113-129.

Weiterführende Literatur:

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Köthe, A., Hoffmann N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben Teil 2 - Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 72; Hannover.

Wittke, B. (1999): Permeabilität von Steinsalz - Theorie und Experiment. Geotechnik in Forschung und Praxis WBI-PRINT 3, Verlag Glückauf GmbH; Essen.

55 **Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)**

55.1 **Definition/Kurzbeschreibung**

Unter Lösungen im Grubenbau sind wässrige Lösungen zu verstehen, die aus der Feuchte der ins Endlager eingebrachten Stoffe (im Versatz, den Verschlussmaterialien und den Abfällen), der Luftfeuchte oder aus einem Zutritt aus dem Wirtsgestein oder dem Deckgebirge stammen.

55.2 **Allgemeine Informationen und Beispiele**

Die Zusammensetzung und Eigenschaften der Lösungen hängen von den Wechselwirkungen der Lösungen mit allen anderen Stoffen in dem Grubenbau (z. B. Wirtsgestein, Abfall, Versatz) ab (siehe FEP Geochemisches Milieu im Grubenbau). Die ursprüngliche Zusammensetzung und Eigenschaften zugetretener Lösungen spielen nur in einem eng begrenzten Übergangsbereich eine Rolle. So ist z. B. das hydrochemische Milieu im Grundwasser des Deckgebirges nur im Bereich der Schachtverschlüsse relevant. Im übrigen Grubengebäude stellt sich ein Gleichgewicht mit den dort anstehenden Salzen und eingebrachten Stoffen ein.

55.3 **Sachlage am Standort**

Zum Zeitpunkt des Verschlusses ist zu unterscheiden zwischen der Situation der eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle im Ostflügel des Endlagers und der eingelagerten vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel des Endlagers:

Ostflügel: Die mit den eingelagerten Gebinden für wärmeentwickelnde Abfälle eingebrachten Restfeuchten sind gering, da es sich ausschließlich um verglaste oder sonstige feste Abfälle handelt (siehe FEP Inventar: Sonstige Stoffe).

Westflügel: Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen ist von mehr Restfeuchte in den Gebinden auszugehen als bei den wärmeentwickelnden Abfällen. Insgesamt ist von ca. 6.772 t Wasser (6.431 t Wasser in den Abfällen und 341 t in den Behältermaterialien) im Westflügel des Endlagers auszugehen, von dem ein Großteil als gebundenes Wasser vorliegt (Peiffer et al. 2011).

Die Gebirgsfeuchte im Hauptsalz der Staßfurt-Serie ist gering (0,012 bis 0,017 Gew.-%). Die geringe Gebirgsfeuchte ist auf die Brekzierung und Homogenisierung der Steinsalzschieben bei der Diapirbildung zurückzuführen, bei der die im Steinsalz eingeschlossenen Lösungen freigesetzt und abgepresst wurden (Bornemann et al. 2008).

Die Feuchte des trockenen Salzgrusversatzes entspricht jener des aufgefahrenen Salzgesteins, der Feuchtegehalt für feuchten Salzgrusversatz beträgt ca. 0,6 Gew.-% in den Richtstrecken und ca. 1,5 Gew.-% im Schachtverschluss (siehe FEP Salzgruskompaktion). Der Quarzsand, der im Bohrlochkonzept in die Einlagerungsbohrlöcher zur Verfüllung des Ringraums zwischen Behälter und Verrohrung sowie zur Trennung der Behälter eingebracht wird, hat als getrockneter Sand eine Restfeuchte von ca. 0,2 Gew.-%.

Nach Verschluss des Endlagers werden zusätzlich Lösungen über den Schacht (siehe FEP Lösungszutritt ins Grubengebäude) zutreten. Weitere Möglichkeiten ergeben sich aus dem Zutritt aus Lösungsreservoirs aus Schichten der Leine-Folge (siehe FEP Fluidvorkommen im Wirtsgestein) und durch Migration im Wärmefeld der Abfälle (siehe FEP Thermomigration). Ein Zutritt von Lösung durch eine Migration im Wärmefeld ist im Westflügel mit den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen nicht zu unterstellen.

Bei der Bewertung der Lösungsmengen im Nahfeld ist die Änderung der Wassermenge durch chemische und mikrobielle Prozesse (vor allem Zersetzungs- und Korrosionsprozesse, thermochemische Sulfatreduktion) sowie die Änderung des Aggregatzustandes durch Verdampfen zu betrachten. Durch Auflösung und Ausfällung kann Hydratwasser gebunden bzw. abgegeben werden.

55.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Generell beeinflussen die Menge und Eigenschaften der Lösungen die Strömungs- und Transportprozesse im Grubengebäude.

Viele Prozesse im Grubenbau sind abhängig vom Lösungsangebot. Insofern laufen sie nur ab, wenn ausreichende Lösungsmengen vorhanden sind. Dabei kann Lösung verbraucht und Gas gebildet werden. So kann es z. B. durch die Lösungen im Grubenbau

nach dem Ausfall von Behältern zu einer Korrosion der Abfallmatrices kommen, die von Menge und Eigenschaften der anstehenden Lösungen abhängt. Nach einer Mobilisierung von Radionukliden kann es dann zu einem Transport über den Lösungspfad kommen.

Bei größeren Lösungsmengen ist deren Einfluss auf den Fluiddruck im Grubenbau zu berücksichtigen.

Das geochemische Milieu der Lösungen im Grubengebäude wirkt sich auf eine Vielzahl physikalischer und chemischer Prozesse aus. Beeinflusst werden unter anderem Sorption, Lösungs- und Fällungsreaktionen, Korrosion (siehe FEP Geochemisches Milieu im Grubenbau) und diverse Quellprozesse (siehe FEP Quellen des Bentonits und FEP Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien).

55.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

55.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

55.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

55.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

55.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Durch den eingebrachten Versatz, die Feuchte des Gebirges und die Restfeuchten in den Abfallgebänden sind geringe Mengen an Lösungen in jedem Grubenbau wahrscheinlich. Ebenfalls werden auch geringe Mengen an Lösungen über den Schacht ins Grubengebäude eindringen.

Wirkung in den Teilsystemen: Gemäß der Definition sind Lösungen im Grubenbau und damit nur im Nahfeld und den übrigen Strecken und Schächten zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Das FEP wirkt indirekt sowohl über das FEP Auflösung und Ausfällung als auch über das FEP Fluiddruck auf die Funktion der Initial-Barrieren. Auf Brennelement-Behälter wirken Lösungen indirekt über die Metallkorrosion.

55.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Begründungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Ein Lösungszutritt ins Grubengebäude erhöht die Menge an Lösungen.

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Versatz

Verschlussmaterial

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Zersetzung von Organika

Wärmeproduktion

Verdampfen von Wasser

Radiolyse

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Abfallmatrix, Versatz, Verschlussmaterialien, Inventar: Sonstige Stoffe: Die Menge der Lösungen in einem Grubenbau kann durch eingebrachte Versatzfeuchte und zementhaltige Materialien erhöht werden.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Strömungsprozesse bewegen Lösungen in einem Grubenbau.

Wärmeproduktion: Die Eigenschaften von Lösungen (z. B. Viskosität) sind temperaturabhängig.

Verdampfen von Wasser: Bei Temperaturen über dem Siedepunkt wird die Lösungsmenge reduziert.

Thermochemische Sulfatreduktion: Bei der thermochemische Sulfatreduktion entsteht Wasser.

Auflösung und Ausfällung: Durch diese Prozesse kann Hydratwasser gebunden bzw. abgegeben werden.

Radiolyse, Zersetzung von Organika, Korrosionsprozesse (außer Korrosion von Glas): Diese Prozesse reduzieren die Menge an vorhandenen Lösungen.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Eigenschaften der Lösungen sind vom geochemischen Milieu abhängig.

Bemerkungen:

Thermomigration: Die Migration von Lösungseinschlüssen kann die Menge an Lösungen in einem Grubenbau erhöhen. Indirekt über Lösungszutritt ins Grubengebäude.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Fluidvorkommen können in Grubenbaue zutreten und die Menge an Lösungen erhöhen (indirekt über Lösungszutritt ins Grubengebäude).

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Erkundungsbohrungen können bevorzugte Wegsamkeiten für Strömungsprozesse darstellen (indirekt über Strömungsvorgänge im Grubengebäude)

Resultierende FEP:

Auflösung und Ausfällung

Begründungen:

Auflösung und Ausfällung: Die Anwesenheit von Lösungen führt zu Auflösungs- bzw. Ausfällungsprozessen. Ausfällung und Auflösungsprozesse laufen auch im Gleichgewichtszustand ab.

Beeinflusste FEP:

Versatz

Fluiddruck

Salzgruskompaktion

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Quellen des Bentonits

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Zersetzung von Organika

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Radiolyse

Radionuklidmobilisierung

Komplexbildung

Begründungen:

Versatz: Die Menge an Lösungen im Grubenbau bestimmt die Feuchte des Versatzes

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Lösungen hängen von den Wechselwirkungen der Lösungen mit allen anderen Stoffen in dem Grubenbau ab und bilden das geochemische Milieu.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung, Quellen des Bentonits: Das Quellen von Stoffen (z. B. Bentonit) wird durch die vorhandenen Lösungen beeinflusst.

Salzgruskompaktion: Die Feuchte erhöht die Kompaktionsgeschwindigkeit Fluiddruck: Die Menge an Lösungen im Grubenbau steuert den Fluiddruck.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Menge an vorhandenen Lösungen ist eine wichtige Randbedingung für die Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

Korrosion-FEP: Bei Kontakt von Matrixmaterialien und Lösungen laufen Korrosionsprozesse ab. Da der Kontakt erst nach einem Ausfall eines Behälters stattfinden kann und dann die vorher vorhandenen Lösungen bereits verbraucht sein können, sind die Korrosion-FEP beeinflusste FEP.

Mikrobielle Prozesse im Salzstock, Zersetzung von Organika: Lösungen im Grubenbau sind eine wichtige Voraussetzung für die Zersetzung von Organika und andere mikrobielle Prozesse.

Radiolyse: Lösungen im Grubenbau sind eine wichtige Voraussetzung für die Radiolyse.

Komplexbildung: Lösungen im Grubenbau sind eine wichtige Voraussetzung für die Bildung von Komplexen.

Radionuklidmobilisierung: Die Menge und das geochemische Milieu der vorhandenen Lösungen entscheiden über die Menge an mobilen Radionukliden.

55.11 Offene Fragen

Keine.

55.12 Literaturquellen

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3 - Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 73; Hannover.

Müller, W., Ewig, F. (2008): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebänden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. - Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, ISTec-A-1301; Garching.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

56 Kanalisation im Salzgrus (2.1.08.04)

56.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Kanalisation wird die Ausbildung von Fließwegen (Kanälen) in Strömungsrichtung verstanden, in denen sich ein strömendes Medium bevorzugt ausbreiten kann.

56.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Eine Kanalisation erfolgt durch eine Veränderung des Strömungsquerschnitts. Möglichkeiten sind:

- Eine Auflösung bzw. Ausfällung des durchströmten Mediums,
- Die Zerstörung des Gefüges des durchströmten Mediums infolge hydraulischer Krafteinwirkung (z. B. Suffosion) und
- eine ungleichmäßige Verdichtung des durchströmten Mediums durch sein Eigengewicht.

Dieses FEP beschreibt die Kanalisation im Salzgrus in den versetzten Strecken und in den Schachtverschlüssen auf Grund von Verdichtungen (Sackungen) im Salzgrus. Auflösungs- und Ausfällungsprozesse werden im FEP Auflösung und Ausfällung beschrieben. Die Strömungsgeschwindigkeiten in den versetzten Grubenbauen reichen auch unter den ungünstigsten Annahmen nicht aus, um zu Veränderungen des Salzgrusgefüges zu führen. Die Kanalisation in Dichtelementen wird in einem separaten FEP behandelt (siehe FEP Kanalisation in Dichtelementen).

56.3 Sachlage am Standort

In horizontalen Grubenbauen im Salinar kann eine Kanalisation durch Sackung von Salzgrusversatz entstehen. Die Verdichtung des Salzgrusversatzes nimmt wegen der mit zunehmender Tiefe anwachsenden Last nach unten hin zu. Dadurch entsteht ein Porositätsgefälle von der Firste zum Boden einer Strecke. Bei gleichbleibender Gesamtporosität ergibt sich dann aus Kontinuitätsgründen eine Erhöhung der Geschwindigkeit des strömenden Mediums in der Firste. In den mit Salzgrus versetzten Strecken, in denen auch Behälter eingelagert sind, ergeben sich sogenannte Druckschatten an

den Behältern, in denen der Versatzdruck geringer ist als in der übrigen Strecke (Popp et al. 2012). Dort wo sich solche Druckschatten ausbilden, kann es zu einer Kanalisierung im Salzgrus kommen.

Durch die schwerkraft-gesteuerte Einbringung des Salzgruses in den Schacht kommt es dort zu einer gleichmäßigen Korngrößenverteilung und Kompaktion. Die o.g. Effekte, die bei der Streckenverfüllung eine Rolle spielen, treten bei der Schachtverfüllung nicht auf. Daher ist für den Salzgrus im Schachtverschluss keine Kanalisierung in Strömungsrichtung zu erwarten.

56.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch die Kanalisierung wird der Strömungswiderstand des Versatzes reduziert. Bei Sackungen in den mit Salzgrus versetzten Strecken wird der Fluidtransport bevorzugt an der Firste erfolgen. Durch die Konvergenz werden diese Hohlräume allerdings mit der Zeit wieder verschlossen. Die mit den Sackungen einhergehende inhomogene Porositätsverteilung des Salzgrusversatzes hat auf seinen integralen Strömungswiderstand bei horizontalen Strömungen nur geringe Auswirkungen (Müller-Lyda 2003).

56.5 Zeitliche Beschränkung

Eine Kanalisierung ist möglich solange die Kompaktion des Salzgruses noch nicht abgeschlossen ist.

Wenn bis dahin zu inhomogene Verdichtungen aufgetreten sind, werden sie aufgrund der Konvergenz nicht dauerhaft erhalten bleiben, da es zu einer bevorzugten Kompaktion der Versatzbereiche mit höherer Porosität und dementsprechender geringerer Stützwirkung kommt.

56.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

56.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

56.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

56.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Eine Kanalisierung im Versatz ist in den versetzten Strecken zu berücksichtigen. Vorübergehende inhomogene Verdichtungen sind wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Definitionsgemäß ist eine Kanalisierung nur in versetzten Strecken und damit im Nahfeld und den übrigen Strecken und Schächten zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Ein Einfluss auf eine Initial-Barriere ist nicht gegeben, der Versatz ist keine Initial-Barriere (siehe FEP Versatz). Der Salzgrus in den Schachtverschlüssen ist nicht von Kanalisierung betroffen.

56.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Salzgruskompaktion

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Auflösung und Ausfällung

Begründungen:

Behälter-FEP: An den Behältern bilden sich Druckschatten aus, die zu einer Kanalisierung im Versatz führen können.

Versatz: Mögliche Kanalisierungen sind abhängig vom Material und dessen Zusammensetzung (Inhomogenitäten usw.).

Salzgruskompaktion: Die ablaufende Kompaktion des Versatzes bestimmt die Möglichkeiten einer Kanalisierung in diesem Versatz.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Ausprägung der Strömungsvorgänge (z. B. Geschwindigkeit) beeinflusst die Möglichkeit einer Kanalisierung im Versatz.

Auflösung und Ausfällung: Kanalisierungen können erweitert bzw. reduziert werden.

Bemerkungen:

Permeabilität: Der Einfluss erfolgt indirekt über die Strömungsvorgänge.

Konvergenz: Die Einflüsse der Konvergenz auf eine mögliche Kanalisierung des Versatzes werden indirekt über das FEP Versatzkompaktion beschrieben.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Versatz

Permeabilität

Begründungen:

Versatz: Die entstandenen Kanäle (z. B. der Firstspalt) werden den Eigenschaften des Versatzes zugeordnet, Abhängigkeiten zu Versatzkompaktion und Konvergenz laufen über das FEP Versatz.

Permeabilität: Eine Kanalisierung führt zu Bereichen mit erhöhten Permeabilitäten.
Bemerkungen:

Bemerkungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Der Einfluss auf die Strömungsvorgänge erfolgt indirekt über die Permeabilität.

Porosität: Eine Kanalisierung kann eine lokale Änderung der Porosität bewirken, entscheidend ist die Änderung der Permeabilität.

Advektion: Der Einfluss ist indirekt über die Permeabilität und die Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

Mechanische Dispersion: Der Einfluss ist indirekt über Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

56.11 Offene Fragen

Bewertung der Relevanz der Kanalisierungen im Salzgrus, u. a. hinsichtlich der Salzgruskompaktion.

56.12 Literaturquellen

Müller-Lyda, I. (2003): Permeabilitätsansatz für Salzgrusversatz. - GRS-Notiz 314500-17, unveröffentlicht; Braunschweig.

Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D. (2012): Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Da-

tenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Leipzig, 30.05.2012.

Weiterführende Literatur:

Müller-Lyda, I., Buhmann, D. (2008): Abschätzung des Einflusses der Nichtlinearität der PPB bei höhenabhängiger Versatzporosität. - GRS-Notiz 314500-64, unveröffentlicht; Braunschweig.

57 Kanalisation in Dichtelementen (2.1.08.05)

57.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Ausbildung von Fließwegen (Kanälen), in denen sich ein strömendes Medium gegenüber seiner Umgebung bevorzugt ausbreiten kann, in den Dichtelementen von Schacht- und Streckenverschlüssen sowie Dichtpfropfen.

57.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Für die Funktionalität der Dichtelemente von geotechnischen Barrieren ist es entscheidend, dass das Verschlussmaterial der Dichtelemente über eine homogen verteilte Porosität und Permeabilität sowie über eine gleichmäßige mechanische Festigkeit, Steifigkeit und chemische Stabilität verfügt. Falls die verschiedenen Bestandteile der Baustoffrezepturen nicht vollständig homogen verteilt sind, kann es zu lokalen Auslaugungen und zu mechanischen Instabilitäten kommen. Dies kann auch passieren, wenn beim lagenweisen Einbringen des Materials die verschiedenen Lagen nicht vollständig aneinander anbinden oder wenn es zu ungleichmäßigen Setzungen oder Quellen kommt, und so Schwächezonen entstehen können.

In Bentonit-Dichtelementen können Strömungskanäle entstehen, wenn sich der Bentonit ungleichmäßig aufsättigt (Schuhmann et al. 2009).

Die Bildung von Strömungskanälen ("piping") in geotechnischen Barrieren ist in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht worden (Börgesson & Herneling 2006, Börgesson & Torbjörn 2006, DBE TEC 2002, Johannesson & Nilsson 2006, Kudla et al. 2007, Pusch 2002, Sitz 2003).

57.3 Sachlage am Standort

Die Baumaterialien für die Dichtelemente der Schachtverschlüsse wurden entsprechend der geologischen Situation und dem aktuellen Lösungsschemismus angepasst. Daher besteht das untere Dichtelement aus Sorelbeton, das mittlere aus Salzbeton (+ eine Langzeitdichtung aus Salzgrus) und das obere aus Bentonit. Die Streckenverschlüsse und Dichtpfropfen werden aus Sorelbeton errichtet. In allen Materialien für

Dichtelemente bzw. an der Kontur der Baukörper (Kontaktzone) kann es zu Kanalisierungen kommen.

Über die Errichtung von Betonbarrieren in Salzbergwerken liegt eine Vielzahl von Erfahrungen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau sowie aus dem Endlager Morsleben, dem Bergwerk Asse und verschiedenen FuE-Vorhaben vor. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für die Entstehung von Strömungskanälen in Dichtelementen wird durch technische Maßnahmen bei der Errichtung und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung der Baustoffe sowie bei ihrer Einbringung stark reduziert.

Für den Aufbau eines gleichmäßigen Druckaufbaus in Bentonit-Dichtelementen ist es entscheidend, dass sich der Bentonit langsam und gleichmäßig aufsättigt (Börgesson & Herneling 2006, Börgesson & Torbjörn 2006). Bei einem ungleichmäßigen Druckaufbau kann es zu Umläufigkeiten in der Kontaktzone Barriere/Gebirge und zur lokalen Erosion mit der Ausbildung von Strömungskanälen kommen. Dem wird dadurch entgegen gewirkt, dass vorkompaktierte Bentonitelemente mit definiertem Wassergehalt eingebaut werden. Während des Einbaus wird der eingebrachte Bentonit unter Anwendung einer speziellen Randverdichtung kompaktiert, um den Kontaktschluss mit dem Gebirge zu optimieren.

57.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Durch eine Kanalisierung in Dichtelementen kann die Funktionalität der geotechnischen Barrieren beeinträchtigt werden. Falls der Fluiddruck geringer ist als der lithostatische Druck können sich die Strömungskanäle im Bentonit sowie ggf. in der Kontaktzone (und Auflockerungszone) wieder schließen.

Aufgrund der Diversifikation der Dichtelemente in den Schachtverschlüssen bleibt hier bei Ausfall eines Dichtelementes durch Kanalisierung die Funktion des Schachtverschlusses gewährleistet. Der Integritätsnachweis wird für alle drei Dichtelemente separat geführt.

Bei den Streckenverschlüssen ist durch zwei Dichtelemente eine Redundanz gegeben, so dass eine Kanalisierung in einem Dichtelement nicht gleich zum Versagen des Streckenverschlusses führt. Der Integritätsnachweis wird bei den Streckenverschlüssen aber nur für das Gesamtbauwerk geführt.

Im Unterschied dazu führt eine Kanalisation im Dichtkörper eines Dichtpfropfens unmittelbar zum Ausfall der Barriere, da diese Barriere nur aus einem Betonkörper besteht.

Durch entsprechende technische Maßnahmen bei der Errichtung der Barrieren und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung der Baustoffe sowie bei ihrer Einbringung wird die Eintrittswahrscheinlichkeit der Entstehung von Fließkanälen in den Dichtelementen stark reduziert (Schuhmann et al. 2009).

57.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

57.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[] wahrscheinlich, [X] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

57.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

57.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Strecken- und Schachtverschlüsse

57.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Eintrittswahrscheinlichkeit für die Entstehung von Strömungskanälen in Dichtelementen wird durch technische Maßnahmen bei der Errichtung und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung der Baustoffe sowie bei ihrer Einbringung reduziert und ist daher als "weniger wahrscheinlich" einzustufen.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das FEP beeinträchtigt die Funktion der Initial-Barrieren "Streckenverschlüsse" und „Schachtverschlüsse“.

Wirkung in den Teilsystemen: Die Dichtelemente sind Komponenten der Verschlussbauwerke, die im Grubengebäude angeordnet sind. Das FEP ist im Teilsystem "Strecken und Schächte" zu berücksichtigen.

57.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Verschlussmaterial
Schachtverschlüsse
Streckenverschlüsse
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
Sonstige Verschlussbauwerke
Fluiddruck
Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Auflockerungszone

Begründungen:

Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, sonstige Verschlussbauwerke: Die Eigenschaften des Verschlussmaterials sowie der Verschlüsse beeinflussen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Kanalisierung in Dichtelementen.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Beeinträchtigungen der Integrität von Schacht- oder Streckenverschlüssen durch Alteration oder Lageverschiebung des Schachtverschlusses können zur Ausbildung von Bereichen mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit (Kanalisierung) führen.

Fluiddruck: Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Fluiddruck und Strömungsvorgänge im Grubengebäude können, z. B. durch Auswaschungen, auch zur Ausbildung von Kanalisierungen beitragen.

Auflockerungszone: Falls sich die Auflockerungszone nicht in der vorgesehenen Weise schließt oder falls es zum Abriss an der Hohlraumkontur kommt, kann es zu einer Kanalisierung am Kontakt Auflockerungszone/Dichtelement kommen.

Bemerkungen:

Geochemisches Milieu, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Das geochemische Milieu und die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen beeinflussen die Ausbildung einer Kanalisierung nur indirekt durch Alterationsvorgänge.

Konvergenz: Die Konvergenz wirkt indirekt über die FEP Verschlussmaterial und Auflockerungszone auf die Kanalisierung der Dichtelemente.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Verschlussmaterial
 Schachtverschlüsse
 Streckenverschlüsse
 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
 Sonstige Verschlussbauwerke
 Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
 Ausfall eines Dichtpfropfens
 Porosität

Permeabilität

Quellen des Bentonits

Begründungen:

Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, sonstige Verschlussbauwerke, Porosität, Permeabilität: Durch eine Kanalisierung im Dichtelement werden die hydraulischen Eigenschaften (Porosität, Permeabilität) und die mechanischen Eigenschaften des Verschlussmaterials und der Verschlüsse beeinflusst.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Eine Kanalisierung kann durch die erhöhte hydraulische Durchlässigkeit zur Alteration der Verschlüsse beitragen.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses, Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses, Ausfall eines Dichtpfropfens: Bei entsprechend starker Ausprägung der Kanalisierung kann es zum vorzeitigen Versagen eines Verschlussbauwerkes kommen.

Quellen des Bentonits: Eine Kanalisierung in Bentonit-Dichtelementen kann zum erneuten Quellen des Bentonits führen.

Bemerkungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude, Advektion, mechanische Dispersion: Die Durchströmung der Verschlüsse aufgrund der Kanalisierung beeinflusst die Strömungsvorgänge im Grubengebäude und den Stofftransport (Advektion, mechanische Dispersion) im Grubengebäude nur indirekt über die Permeabilität.

57.11 Offene Fragen

Risiko des Piping in Relation zur Geschwindigkeit der Aufsättigung von Bentonit.

57.12 Literaturquellen

Börgesson, L., Herneling, J. (2006): Consequences of Loss or Missing Bentonite in a Deposition Hole. - SKB, TR-06-13; Stockholm.

Börgesson, L., Torbjörn, S. (2006): Piping and Erosion in Buffer and Backfill Materials. - SKB, R-06-80; Stockholm.

DBE TEC (2002): F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. Hydraulische Modellierungen. Abschlussbericht. - DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Johannesson, L.E., Nilsson, U. (2006): Deep Repository - Engineered Barrier Systems. Geotechnical Behaviour of Candidate Backfill Materials. Laboratory Tests and Calculations for determining Performance of the Backfill. - SKB, R-06-73; Stockholm.

Kudla, W., Hoffmann, M., Gassner, W., Gruner, M., Glaubach, U. (2007): TDR-Messsystem zur Überwachung von Bentonitabschlussbauwerken. Eignungstests und halbtechnische Versuche. - TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau; Freiberg

Neretnieks, I. (2006): Flow and transport through a damaged buffer - Exploration of the impact of a cemented and an eroded buffer. - SKB, TR-06-33; Stockholm.

Pusch R. (2002): The Buffer and Backfill Handbook, Part 2: Materials and Techniques. – SKB, Technical Report TR-02-12 Stockholm.

Schuhmann, R. Emmerich, K., Kemper, G., Königer, F. (2009): Verschlussystem mit Äquipotenzialsegmenten für die untertägige Entsorgung (UTD und ELA) gefährlicher Abfälle zur Sicherstellung der homogenen Befeuchtung der Dichtelemente und zur Verbesserung der Langzeitstabilität, Schlussbericht. - BMBF-Förderkennzeichen: 02C0922, Karlsruhe.

Sitz P. (2003): Forschungsvorhaben: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Verschlussbauwerke für UTD im Salinar. Bau und Test eines Verschlussbauwerkes unter realen Bedingungen. TU-BAF, Freiberg.

58 Lösungszutritt ins Grubengebäude (2.1.08.06)

58.1 Definition/Kurzbeschreibung

Im Verlauf der Entwicklung des Endlagersystems können aus dem Salzgestein oder dem Deckgebirge Lösungen in das Grubengebäude gelangen.

58.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die in das Grubengebäude zutretende Lösungsmenge ist im Wesentlichen abhängig von

- den hydraulischen Randbedingungen,
- den Strömungswiderständen im gesamten Grubengebäude,
- der Auslegung und der bautechnischen Ausführung der verwendeten Verschlussbauwerke,
- der Lage des Grubengebäudes zu einem Lösungseinschluss oder grundwasserführenden Schichten und
- der Menge und Verteilung der Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein.

58.3 Sachlage am Standort

Ein Zutritt von Lösungen aus dem Deckgebirge über die Schachtverschlüsse ist für die mit nicht kompaktierendem Schotter versetzten Grubenbaue in der Nähe zu den Schachtverschlüssen zu erwarten. Die zutretenden Lösungen werden in dem Hohlraumvolumen des Schotterversatzes in den Infrastrukturbereichen gespeichert. Ein weiteres Vordringen der Lösungen über die Strecken und Schächte wird auf Grund der Strömungswiderstände der Streckenverschlüsse und in den mit Salzgrus versetzten Grubenbauen behindert (siehe FEP Strömungsvorgänge im Grubengebäude).

Der Zutritt von Lösungen aus dem Wirtsgestein in das Grubengebäude kann aus Lösungsreservoirs in anhydritdominierten Salzgesteinen der Leine-Folge (im wesentlichen Anhydritmittel, Gorleben-Bank und Hauptanhydrit) erfolgen, sofern diese Reservoirs nicht schon bei der Auffahrung des Grubengebäudes entleert wurden. Details zu

den Reservoiren sind im FEP Fluidvorkommen im Wirtsgestein beschrieben. Der größte einzelne Lösungszutritt kommt aus dem Hauptanhydrit und beträgt 165 m^3 (Stand: 30. September 2000, BfS 2002). Wegsamkeiten zum Deck- und Nebengebirge über durchgehende anhydritische Schichten sind nicht zu berücksichtigen, da die Anhydritformationen beim Salzaufstieg zerblockt wurden und als isolierte Schollen vorliegen (Bornemann et al. 2008).

In der Umgebung der Einlagerungsbereiche im Hauptsalz sind dagegen keine Lösungsreservoir zu erwarten. Die ehemals im Hauptsalz der Staßfurt-Folge enthaltenen Lösungen wurden infolge der Durchbewegung beim Salzaufstieg entweder zum Salzspiegel hin oder in die Anhydrit-Kluftspeicher der Leine-Folge, vor allem in den Hauptanhydrit, abgepresst. Der Wassergehalt des Hauptsalzes liegt bei 0,012 bis 0,017 Gew.- % (Bornemann et al. 2008). Zu berücksichtigen ist die Möglichkeit eines Lösungszutrittes aus dem Wirtsgestein durch die Migration geringer Lösungsmengen im Wärmefeld der Abfälle (siehe FEP Thermomigration). Es gibt Abschätzungen für die Migration im Wärmefeld von HAW-Kokillen in Bohrlöchern (Rübel et al. 2011).

Im Endlagerkonzept ist ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen Einlagerungsbereichen und den carnallithaltigen Schichten vorgesehen, durch den gewährleistet werden soll, dass ein Wasserzutritt aus carnallithaltigen Schichten auf Grund einer thermischen Zersetzung des Carnallits nicht zu betrachten ist (siehe FEP Thermische Carnallitzersetzung).

58.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Der Zutritt von Lösungen in das Grubengebäude erhöht die dortige Menge an Lösungen. Die Menge an Lösungen in einem mit Salzgrus versetzten Grubenbau hat Einfluss auf das Kompaktionsverhalten des Versatzes. Beim Lösungszutritt über den Schacht ist der Einfluss des zutretenden Wassers auf das Quellverhalten des Bentonits im oberen Dichtelement zu berücksichtigen.

Ein Lösungszutritt in die Einlagerungsorte (Bohrloch, Strecke) bewirkt eine verstärkte Korrosion von Behältermaterialien sowie sonstigen Einbaumaterialien und damit eine verstärkte Gasbildung. Wenn die zutretende Lösungsmenge ausreicht, die Wände der Behälter durchzukorrodieren oder Behälter durch mechanische Belastung ausgefallen

sind, kommt es nachfolgend zu einer Mobilisierung und Freisetzung von Radionukliden (siehe FEP Lösungen im Grubenbau).

58.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

58.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

58.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

58.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

58.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Ein begrenzter Lösungszutritt über den Schachtverschluss ins Grubengebäude ist wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Definitionsgemäß in den Strecken und Schächten und gegebenenfalls im Nahfeld zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Ein Lösungszutritt ins Grubengebäude beeinflusst über das Quellen des Bentonits indirekt die Initial-Barrieren.

58.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Begründungen:

Vorzeitiges Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses: Aus dem vorzeitigen Versagen eines Schachtverschlusses erfolgt ein Lösungszutritt ins Grubengebäude.

Beeinflussende FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Fluiddruck

Porosität

Permeabilität

Auflockerungszone

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Deck- und Nebengebirge

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Thermomigration

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Erkundungsbohrungen können bevorzugte Wegsamkeiten für Lösungen bieten und damit einen Lösungszutritt ins Grubengebäude begünstigen.

Fluiddruck: Die Druckverhältnisse sind eine wichtige Randbedingung für einen Lösungszutritt.

Porosität: Die Porosität und ihre Verteilung beeinflusst die Möglichkeit und Ablauf eines Lösungszutrittes.

Permeabilität: Die Durchlässigkeit von Verschluss- und Versatzmaterialien bestimmt das Ausmaß eines Lösungszutrittes.

Auflockerungszone, Klüfte im Wirtsgestein: Können ein Lösungszutritt ins Grubengebäude begünstigen.

Deck- und Nebengebirge: Die vorhandene Wassersäule im Deck- und Nebengebirge definiert den am Schacht anstehenden hydraulischen Druck.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Die Menge an zutretenden Lösungen kann durch die Fluidvorkommen im Wirtsgestein bestimmt werden.

Thermomigration: Eine Thermomigration kann einen Zutritt von Lösungen ins Grubengebäude verursachen.

Bemerkungen:

Verschlussmaterial: wirkt indirekt über das FEP Schachtverschlüsse.

Porosität: Wirkt indirekt über Permeabilität.

Versatzkompaktion: Wirkt indirekt über die Porosität und die Permeabilität.

Schachtverschlüsse, Lageverschiebung des Schachtverschlusses, Kanalisierung von Dichtelementen: Wirken indirekt über die Permeabilität.

Resultierende FEP:

Lösungen im Grubenbau

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Begründungen:

Lösungen im Grubenbau: Ein Lösungszutritt ins Grubengebäude erhöht die Menge an Lösungen.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Ein Lösungszutritt ins Grubengebäude ist bereits ein Strömungsprozess, der aber auf Grund seiner Bedeutung extra im FEP-Katalog aufgeführt wird.

Beeinflusste FEP:

Quellen des Bentonits

Begründungen:

Quellen des Bentonits: Der Bentonit in den oberen Dichtelelementen wird sich nach Einbau der Schachtverschlüsse durch zutretendes Grundwasser aufsättigen und quellen.

Bemerkungen:

Geochemisches Milieu, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Beide FEP wirken indirekt über die Lösungen im Grubenbau.

Konvergenz, Fluiddruck: Konvergenz und Fluiddruck werden indirekt über die Lösungen im Grubenbau beeinflusst.

Versatzkompaktion wird indirekt über die Lösungen im Grubenbau und den Fluiddruck beeinflusst.

Quellen des Bentonits: Wird indirekt über Lösungen im Grubenbau beeinflusst.

Radionuklidtransport in der Gasphase: wird indirekt über die Lösungen im Grubenbau und Strömungsvorgänge im Grubengebäude beeinflusst.

58.11 Offene Fragen

Keine.

58.12 Literaturquellen

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3 - Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 73; Hannover.

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS, 2002): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). Bundesamt für Strahlenschutz: <http://www.bfs.de>.

Rübel A., Buhmann, D., Meleshyn, A., Mönig, J., Spiessl. S. (2011): Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations. - GRS-A-3592, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Braunschweig.

59 Strömungsvorgänge im Grubengebäude (2.1.08.07)

59.1 Definition/Kurzbeschreibung

In einem Grubenbau vorhandene Fluide können in Folge der herrschenden Potentialunterschiede die Resthohlräume des Grubengebäudes durchströmen. Wegsamkeiten für Fluide gibt es im Versatz, in den Porenräumen der technischen Bauwerke, in den Auflockerungszonen und im Porenraum der Abfallgebände.

59.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die wesentlichen Antriebsmechanismen für Strömungsprozesse in Lösungen sind der hydraulische Gradient, Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Lösungen (Auftrieb) oder innerhalb einer Lösung (Konvektion) sowie im Grubengebäude die Konvergenz. Strömungsvorgänge in der Gasphase werden durch Gasbildung, die Konvergenz und den Auftrieb verursacht. In lösungserfüllten Hohlräumen können gebildete Gase zu einer Verdrängung vorhandener Lösungen führen.

Werden in einem Medium Fluide in unterschiedlichen Phasen bewegt, spricht man von Mehrphasenströmung. In der Natur am bedeutendsten ist die Zweiphasenströmung von Gasgemischen (z. B. Luft) und wässrigen Lösungen. Treten im Porenraum mehrere Phasen auf, werden die Permeabilitäten für die einzelnen Phasen verringert (effektive Permeabilitäten). Das Verhältnis zwischen effektiver und absoluter Permeabilität ist als relative Permeabilität für die jeweilige Phase definiert.

59.3 Sachlage am Standort

Am Standort sind grundsätzlich folgende Strömungsprozesse denkbar:

- eine laminare Strömung wässriger Lösungen in gesättigten Grubenbauen, z. B. durch Konvergenz (Darcy-Strömung, turbulente Strömungen sind unter Endlagerbedingungen unwahrscheinlich).
- eine Gasströmung auf Grund von Druckgradienten, z. B. durch die Konvergenz der Grubenbaue (Verdrängung) und durch die Bildung von Gasen

- ein Zweiphasenfluss, dort wo zutretende Lösungen auf vorhandene Gasgemische treffen oder durch das Einbringen wasserhaltiger Materialien (z. B. Bentonit, Salzbeton) zwei fluide Phasen vorliegen.

Die Durchströmung des Versatzes und der technischen Barrieren wird durch deren Strömungswiderstand und gegebenenfalls durch den Gaseindringdruck beeinflusst. Dabei ist jeweils die Auflockerungszone zu berücksichtigen. Mit zunehmender Kompaktion erhöht sich der Strömungswiderstand des Salzgrusversatzes (siehe FEP Salzgruskompaktion).

Bei auslegungskonformer Funktionsweise der Verschlussbauwerke ist im Vergleich zum Speichervolumen im Infrastrukturbereich nur von geringen Lösungsmengen in den Grubenbauen auszugehen (siehe FEP Lösungszutritt ins Grubengebäude und Lösungen im Grubenbau). Das Hohlraumvolumen des Infrastrukturbereiches steht zur Speicherung zutretender Lösungen zur Verfügung.

Ein hydraulischer Gradient ist nach Verschluss des Endlagers zunächst nur am Schachtverschluss zu betrachten. Untersuchungen, z. B. Buhmann et al. (2008) oder Rübel & Mönig (2010) zeigen, dass die Strömungsprozesse der Lösungen sehr langsam ablaufen und die durchströmenden Lösungsmengen gering sind. Ob diese Lösungsmengen bis zu den Abfällen vordringen können, hängt von den hydraulischen Gegebenheiten ab (z. B. Durchlässigkeit des Salzgrusversatzes).

Strömungsprozesse von Lösungen und Gasen sind für das gesamte Grubengebäude zu betrachten. Insbesondere bei Betrachtungen von Entwicklungen des Endlagersystems, bei denen Verschlussbauwerke versagen oder unerwartete Lösungsvolumina innerhalb des Wirtsgesteins auftreten, sind deren Auswirkung von Bedeutung. Im Nahbereich der Abfälle können dann neben der Advektion auch Konvektionen, d. h. Strömungen von Salzlösungen, die durch Temperatur- und Konzentrationsunterschiede ausgelöst werden, auf Grund der Wärmeproduktion durch die radioaktiven Abfälle entstehen.

Durch die Gebirgskonvergenz werden die fluidgefüllten Hohlräume komprimiert und es kommt zu Strömungen der Fluide (Lösung, Gas oder Mehrphasenfluide) im Grubengebäude. Die Wechselwirkungen zwischen zutretenden Lösungen und ausströmenden Gasen unter Endlagerbedingungen ist noch nicht ausreichend untersucht.

Der Lösungszutritt über den Schacht auf Grund des hydrostatischen Drucks der anstehenden Wassersäule wird im FEP Lösungszutritt ins Grubengebäude behandelt.

59.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Strömungsprozesse beeinflussen die Fluidmengen in den Grubenbauen und den Transport der in den Fluiden vorliegenden Stoffe. Beim Transport sind sowohl der Lösungs- als auch der Gaspfad zu betrachten. Weitere Beschreibungen und Auswirkungen der Transportprozesse in porösen Medien finden sich in den entsprechenden FEP (Advektion, Diffusion etc.).

Strömungsprozesse können zu einer Kanalisierung in Dichtelementen führen, z. B. können im Bentonit-Dichtelement im Schachtverschluss Strömungskanäle entstehen, wenn sich der Bentonit ungleichmäßig aufsättigt (siehe FEP Kanalisierung in Dichtelementen).

59.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

59.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

59.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

59.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

59.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Durch die Konvergenz wird eine Gasströmung im Grubengebäude angetrieben. Strömungen von Lösungen sind auf Grund der endlichen Permeabilität der Verschlussbauwerke ebenfalls wahrscheinlich, z. B. der Zulauf von geringen Mengen an Lösungen über den Schachtverschluss in den Infrastrukturbereich.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist per Definition nur im Nahfeld und den Strecken und Schächten zu betrachten.

Beeinträchtigung auf Initial-Barrieren: Die bei der Durchströmung von porösen Medien durch Reibung hervorgerufene Strömungskraft auf das Medium reicht unter Endlagerbedingungen nicht aus, um die Funktionalität der Barrieren zu beeinträchtigen. Sie können aber gegebenenfalls die Kanalisierung in Bentonit beeinflussen (siehe FEP Kanalisierung in Dichtelementen).

59.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Konvergenz

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Begründungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Ist bereits ein Strömungsprozess, der aber auf Grund seiner Bedeutung extra im FEP-Katalog aufgeführt wird.

Konvergenz: Da Gase im Grubengebäude vorhanden sind und die Verschlussbauwerke nicht absolut gasdicht sind, kommt es durch die Konvergenz zu einer Gasströmung im Grubengebäude.

Beeinflussende FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Fluiddruck
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Ausfall eines Dichtpfropfens
Porosität
Permeabilität
Lösungen im Grubenbau
Geochemisches Milieu im Grubenbau
Thermische Expansion oder Kontraktion
Gasmenge im Grubenbau
Gaseindringdruck

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Sind Erkundungsbohrungen nicht ordnungsgemäß verschlossen, können sie Wegsamkeiten für Strömungsvorgänge liefern.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Durch den Ausfall einer Bohrlochverrohrung können Lösungen in das Bohrloch gelangen und dort in dem Quarzsandversatz zirkulieren.

Fluiddruck: Der Fluiddruck ist eine entscheidende Randbedingung für Strömungsprozesse im Grubengebäude.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Volumenänderungen können Lösungen verdrängen und Strömungsprozesse auslösen.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Durch Temperaturänderungen kommt es zu Dichteänderungen von Fluiden und Konvektionsströmungen können ausgelöst werden.

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses, Vorzeitiges Versagen eines Dichtpfropfens: Öffnet eine Wegsamkeit für Strömungsprozesse.

Porosität: Die durchflusswirksame oder effektive Porosität bestimmt die Menge an Fluid die das poröse Medium durchströmt.

Permeabilität: Die Permeabilität beschreibt den Einfluss der Beschaffenheit der Matrix des durchströmten Mediums auf die Strömung des Fluids.

Lösungen im Grubenbau: Die Menge an vorhandenen Lösungen hat entscheidenden Einfluss auf die ablaufenden Strömungsprozesse.

Gasmenge im Grubenbau: Die Menge an vorhandenen Gasen hat entscheidenden Einfluss auf die ablaufenden Strömungsprozesse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Das Geochemische Milieu beeinflusst die Viskosität des Fluids.

Gaseindringdruck: Wird der Gaseindringdruck überschritten, wird die Gasströmung zum dominierenden Strömungsvorgang.

Resultierende FEP:

Advektion

Begründungen:

Advektion: Die Strömung eines Fluids löst einen advektiven Transport der darin enthaltenen Stoffe aus.

Beeinflusste FEP:

Fluiddruck

Lösungen im Grubenbau

Kanalisation im Salzgrus

Kanalisation in Dichtelementen

Gasmenge im Grubenbau

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Diffusion

Matrixdiffusion

Begründungen:

Fluiddruck: Da Strömungsprozesse Fluide bewegen, beeinflussen sie auch den Fluiddruck.

Lösungen im Grubenbau, Gasmenge im Grubenbau: Fluide im Grubenbau werden durch Strömungsprozesse verteilt.

Kanalisation im Salzgrus: Strömungsprozesse können zu einer Kanalisation im Versatz führen.

Kanalisation in Dichtelementen: Strömungsprozesse können zu einer Kanalisation in Dichtelementen führen.

Grundwasser- und Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Ein Austritt von Lösungen aus dem Grubengebäude kann lokal die Gas bzw. Grundwasserströmung beeinflussen.

Diffusion, Matrixdiffusion: Konzentrationsunterschiede können durch Strömungsvorgänge verändert werden und beeinflussen deshalb Diffusionsprozesse.

Bemerkungen:

Konvergenz: Der Einfluss wird indirekt über den Fluiddruck beschrieben.

Porosität: Der Einfluss von Strömungsprozessen auf die Porosität wird in den FEP Kanalisation im Versatz und Kanalisation in Dichtelementen beschrieben.

Quellen des Bentonits: Wirkt indirekt über Lösungen im Grubenbau.

Geochemische Milieu: Wird indirekt über die von den Strömungsvorgängen bewegten Lösungen im Grubenbau beeinflusst.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Die Transportprozesse Diffusion und Advektion führen Stoffe ab.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Wirkt indirekt über Lösungen.

59.11 Offene Fragen

- Lösungsbewegungen bei kleinen Porositäten bzw. geringen Lösungsmengen
- Zweiphasenflussparameter für Salzgrus
- Modellbeschreibung des Zweiphasenflusses unter Endlagerbedingungen, insbesondere Behinderung von zutretenden Lösungen in das gasgefüllte Endlager

59.12 Literaturquellen

Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J. (2008): Untersuchung und Ermittlung von Freisetzungsszenarien. - Teilbericht zum Projekt ISIBEL: "Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW", Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-233; Braunschweig.

Rübel A., Mönig, J. (2010): Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3521; Braunschweig.

Weiterführende Literatur:

Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. - Dover Publication, Inc; New York.

Brooks, R.H., Corey, A.T. (1964): Hydraulic Properties of Porous Media. - Hydrology Papers No. 3, Colorado State University; Fort Collins.

Clifford K.H., Webb, S.W. (2006): Gas Transport in Porous Media. - Theory and Applications of Transport in Porous Media, Vol. 20, Springer-Verlag; Dordrecht.

Platten, J.K., Legros, J.C. (1984): Convection in Liquids. - Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg.

Rübel A., Buhmann, D., Meleshyn, A., Mönig, J., Spiessl, S. (2011): Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations. GRS-A-3592, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Braunschweig.

Van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. - Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.

60 Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

60.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bei Wasseraufnahme quillt Bentonit und übt im eingespannten Zustand einen Druck auf die Hohlraumkontur und auf angrenzende Bauwerksteile aus.

60.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Bentonit wird aufgrund seiner günstigen Eigenschaften in den Verschlusskonzepten für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen als Baustoff für Dichtelemente eingesetzt. Diese Materialeigenschaften umfassen die Plastizität, das Quellvermögen bei Lösungszutritt, die geringe Permeabilität und das hohe Sorptionsvermögen für Radionuklide. Der Quelldruck des Bentonits bewirkt im eingespannten Zustand einen Druckaufbau in der Kontaktfuge zwischen Dichtelement und Gebirge. Der resultierende Stützdruck auf das Gebirge kann durch eine Beimischung von Sand oder anderem Gesteinsbruch so begrenzt werden, dass die Integrität des angrenzenden Gebirges nicht beeinträchtigt wird. Für die Funktionalität von Bentonit-Dichtelementen ist es entscheidend, dass sich der Bentonit langsam und gleichmäßig aufsättigt, damit sich keine Strömungskanäle ("piping") bilden können (Börgesson & Herneling 2006, Börgesson & Torbjörn 2006, Schuhmann et al. 2009). Bentonite verlieren einen Teil ihres Quellpotentials mit zunehmender Salinität des durchströmenden Fluids oder durch Lösungen mit Zement-Auslaugungsprodukten (Pusch 2002, Johannesson & Nilsson 2006).

Die Nutzung von Bentonit in Verschlussbauwerken in Salzgesteinen wurde in den Forschungsprojekten "Dammbauwerk Sondershausen" (Sitz 2003) sowie "Schachtverschluss Salzdetfurth" (DBE TEC 2002) untersucht. Weitere Ergebnisse liegen aus einer Vielzahl anderer internationaler Endlagerprojekte vor (z. B. Pusch 2002, Johannesson & Nilsson 2006, Schuhmann et al. 2009).

60.3 Sachlage am Standort

Das oberste Dichtelement der Verschlüsse in den Schächten Gorleben soll jeweils aus Ca-Bentonit (Typ Salzdetfurth) bestehen (vgl. FEP Schachtverschlüsse) und die Schächte einerseits gegen von oben zutretende Deckgebirgslösungen und anderer-

seits gegen möglicherweise lateral aus der Gorleben-Bank zutretende Salzlösungen abdichten (Engelhardt et al. 2011). Die Funktionalität des Materials und des Dichtelementes im salinarem Milieu wurde bei In-situ-Versuchen im Zuge des FuE-Projektes Schachtverschluss Salzdetfurth nachgewiesen (Breidung 2002, DBETEC 2002).

Der Bentonit wird mit einem definierten Wassergehalt ($< 10\%$) eingebaut und während des Einbaus kompaktiert, um den Kontaktschluss mit dem Gebirge zu optimieren. Nach dem Einbau des Schachtverschlusses wird sich der Bentonit durch zutretendes salinares Grundwasser aufsättigen und quellen. Durch konstruktive Maßnahmen wird sichergestellt, dass sich der Bentonit zu Beginn der Nachverschlussphase langsam und gleichmäßig aufsättigt (Kudla et al. 2007, Schuhmann et al. 2009).

Aufgrund der Aufsättigung des vorgesehenen binären (Grobkorn/Feinkorn) Bentonitmaterials mit salinaren Lösungen ist der Quelldruck auf 1 MPa begrenzt. Dieser Druck reicht aus, um durch die Einspannung des Dichtelementes an der Schachtkontur die Dichtfunktion zu gewährleisten. Andererseits ist der Quelldruck niedrig genug, dass der Frac-Druck des angrenzenden Gebirges nicht überschritten wird. Bei der Bewertung des Quelldrucks ist das Quellpotential des vorgesehenen Bentonits bei Zutritt der erwarteten Deckgebirgslösungen zu prüfen.

60.4 Standortspezifische Auswirkungen

Der durch das salinare Milieu begrenzte Quelldruck des Bentonits reicht aus, um die Dichtfunktion des Schachtverschlusselementes zu gewährleisten. Andererseits ist er so niedrig, dass er den Fracdruck des angrenzenden Gebirges nicht überschreitet.

Durch eine entsprechende Einbautechnik und begleitende Qualitätssicherungsmaßnahmen wird sichergestellt, dass sich die Bentonit-Dichtelemente beim Einbau gleichmäßig aufsättigen (Kudla et al. 2007, Schuhmann et al. 2009). Umläufigkeiten in der Kontaktzone mit einer lokalen Erosion ("Piping") infolge einer unregelmäßigen Aufsättigung des Bentonits und einem resultierenden ungleichmäßigen Quelldruckaufbau im Dicht-element sind daher weniger wahrscheinlich.

Das Sorptionsvermögen des Bentonits für Radionuklide wird durch die Salinität und den Gehalt an gelösten Zementbestandteilen der durchströmten Betonbarrieren beeinträchtigt (Hofmann et al. 2004).

Da erwartet wird, dass der Permafrost während zukünftiger Kaltzeiten bis zu 200 m in den Untergrund reichen wird (Mrugalla 2011), ist eine Beeinflussung der Bentonit-Dichtelemente der Schachtverschlüsse durch tiefreichendes Gefrieren während der Kaltzeiten (vgl. Birgersson et al. 2010) nicht zu erwarten. Zudem sind Kaltzeiteinflüsse erst zu späten Zeiten nach der erforderlichen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse zu unterstellen, so dass sie dann nicht mehr sicherheitsrelevant sind.

60.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

60.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

60.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

60.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse

60.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Funktionalität des Bentonit-Dichtelementes im Schachtverschluss ist erst nach dem Quellen des Bentonits gegeben. Deshalb wird durch technische Maßnahmen sichergestellt werden, dass nach dem Einbau Lösungen zutreten können, die zum Aufsättigen und Quellen des Bentonits führen werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit des Bentonitquellens ist daher "wahrscheinlich".

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Das FEP wirkt sich direkt auf die Funktion der Initial-Barriere "Schachtverschlüsse" sowie, aufgrund des Quelldrucks, indirekt über Spannungsänderungen auf das "Wirtsgestein" aus.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist Teil des Schachtverschlusses und daher im Teilsystem "Strecken und Schächte" zu berücksichtigen. Weiterhin ergibt sich aufgrund des Quelldrucks eine Beeinflussung des Teilsystems "Wirtsgestein".

60.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Verschlussmaterial
 Schachtverschlüsse
 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
 Konvergenz
 Lageverschiebung des Schachtverschlusses
 Lösungen im Grubenbau
 Kanalisierung in Dichtelementen
 Lösungszutritt ins Grubengebäude
 Geochemisches Milieu im Grubenbau
 Auflockerungszone
 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse: Das Quellen des Bentonits hängt vom verwendeten Verschlussmaterial und dem Design des Schachtverschlusses ab.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Bentonitquellen kann durch eine Alteration des Schachtverschlusses (Mobilisierung von Zement- Auslaugungsprodukten) beeinträchtigt werden.

Konvergenz: Das Quellen von Bentonit in Dichtelementen wirkt unmittelbar auf die Schachtwandung ein und reduziert hier durch einen Stützdruck die Konvergenz.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Bei zu hohem Quelldruck kann es zu Lageverschiebungen des Schachtverschlusses kommen.

Lösungen im Grubenbau: Das Bentonitquellen wird durch „Lösungen im Grubenbau“ (Deckgebirgslösungen) ausgelöst.

Kanalisationen in Dichtelementen: Diese Entwicklung kann zum ungleichmäßigen Aufsättigen und Quellen des Bentonits führen.

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Lösungszutritte aus dem Salzgebirge oder dem Deckgebirge führen entsprechend ihrem unterschiedlichen Chemismus zu einem unterschiedlichen Quellen des Bentonits. So verlieren Bentonite einen Teil ihres Quellpotentials mit zunehmender Salinität des durchströmenden Fluids.

Geochemisches Milieu: Das Geochemische Milieu ist daher von großer Bedeutung für das Bentonitquellen.

Auflockerungszone: Die Auflockerungszone an der Schachtkontur stellt nach der Errichtung des Bentonitdichtelementes eine Wasserwegsamkeit dar, die zur Aufsättigung und zum Quellen des Bentonits beiträgt.

Spannungsänderungen und Spannungumlagerungen: Die Spannungen im umgebenden Salzgebirge wirken sich auf das Quellen des Bentonits aus.

Bemerkungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Dieser Prozess beeinflusst das Quellen des Bentonits indirekt über Lösungen im Grubenbau.

Thermische Expansion und Kontraktion: Thermische Einflüsse auf das Gebirge wirken sich indirekt auf das Quellen des Bentonits über Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen aus.

Resultierende FEP:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Begründungen:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Das Quellen des Bentonits führt zu Volumenänderungen des Materials.

Beeinflusste FEP:

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Fluiddruck

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Porosität

Auflockerungszone

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse, Porosität: Das Quellen des Bentonits verändert die Eigenschaften des Verschlussmaterials, u. a. die Porosität, sowie die Eigenschaften des Schachtverschlusses.

Fluiddruck: Der Quelldruck des Bentonits wirkt sich auch auf den Fluiddruck in den Poren aus.

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: Falls der Bentonit des Dichtelementes nicht in der vorgesehenen Weise quillt, kann es zum vorzeitigen Versagen des Schachtverschlusses kommen.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Falls der Quelldruck des Bentonits zu hoch ist, kann es zu einer Lageverschiebung des Schachtverschlusses kommen.

Auflockerungszone: Durch das Quellen des Bentonits schließen sich die Risse in der Auflockerungszone der Schachtkontur.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Außerdem führt das Bentonitquellen aufgrund der Einspannung des Dichtelementes zu Spannungsänderungen im Gebirge.

Bemerkungen:

Alteration der Schacht- und Streckenverschlüsse: Die Alteration der Schacht- und Streckenverschlüsse wird über das geochemische Milieu indirekt durch das Quellen des Bentonits (Bentonit puffert das geochemische Milieu) beeinflusst.

60.11 Offene Fragen

- Risiko des Pippings in Relation zur Geschwindigkeit der Aufsättigung
- Kompaktion und Konturanbindung
- Einbaufeuchte

60.12 Literaturquellen

Aland, H.J., Handke, N., Leuschner, J., Bodenstein, J., Sitz, P., Gruner, M., Springer, H., Maelzer, K. (1999): Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluss aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen. - Geotechnik 22, H. 1, S. 56-62; Freiberg.

Birgersson, M., Karnland, O., Nilsson, E. (2010): Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. - Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-10-40; Stockholm.

Börgesson, L., Herneling, J. (2006): Consequences of Loss or Missing Bentonite in a Deposition Hole. - SKB, TR-06-13; Stockholm.

Börgesson, L., Torbjörn, S. (2006): Piping and Erosion in Buffer and Backfill Materials. - SKB, R-06-80; Stockholm.

Breidung, P. (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. - BMBF-Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen: 02C 0516, K+S; Bad Salzdetfurth.

DBE TEC (2002): F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. Hydraulische Modellierungen. Abschlussbericht. - DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Daemen, J.J.K., Ran, C. (1996): Bentonit as a Waste Isolation Pilot Plant Shaft Sealing Material. - Sandia National Laboratories, SAND 96-1968; Washington.

Engelhardt, H.H., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Gruner, M., Schwandt, A., Sitz P. (2003): Salzton - Natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar. - Kali u. Steinsalz, 2/2003, 12-17; Kassel.

Hofmann, H., Bauer, A., Warr, L.N. (2004): Behaviour of smectite in strong salt brines. - Clays and Clay Minerals, 52: 14-24.

Johannesson, L.E., Nilsson, U. (2006): Deep Repository - Engineered Barrier Systems. Geotechnical Behaviour of Candidate Backfill Materials. Laboratory Tests and Calculations for determining Performance of the Backfill. - SKB, R-06-73; Stockholm.

Kudla, W., Hoffmann, M., Gassner, W., Gruner, M., Glaubach, U. (2007): TDR-Messsystem zur Überwachung von Bentonitabschlussbauwerken. Eignungstests und halbtechnische Versuche. - TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Freiberg.

Neretnieks, I. (2006): Flow and transport through a damaged buffer - Exploration of the impact of a cemented and an eroded buffer. - SKB, TR-06-33; Stockholm.

Pusch, R. (2002): The Buffer and Backfill Handbook, Part 2: Materials and Techniques. - SKB, Technical Report TR-02-12; Stockholm.

Schuhmann, R. Emmerich, K., Kemper, G., Königer, F. (2009): Verschlussystem mit Äquipotenzialsegmenten für die untertägige Entsorgung (UTD und ELA) gefährlicher Abfälle zur Sicherstellung der homogenen Befeuchtung der Dichtelemente und zur Verbesserung der Langzeitstabilität, Schlussbericht. - BMBF-Förderkennzeichen: 02C0922; Karlsruhe.

Sitz, P., Elert, K.-H., Schwandt, A., Gruner, M.G. (2001): Salztone als natürliche Analoga für Bentonit - Dichtelemente im salinaren Gebirge. - Exkursionsföh.u.Veröffentl. GGW, 211 (2001): 5-1; Berlin.

Sitz, P. (2003): Forschungsvorhaben: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Verschlussbauwerke für UTD im Salinar. Bau und Test eines Verschlussbauwerkes unter realen Bedingungen.- BMBF Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen: 02 C 05472, TU-BAF: Freiberg.

Sitz, P., Gruner, M., Rumphorst, K. (2004): Bentonitdichtelemente für lang-zeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar. - Kali u. Steinsalz, 1/2004: 7-13; Kassel.

Wagner, K. (2005): Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge. - Diss. Fak.f.Geowiss, Geotech.u.Bergbau, TU Freiberg.

61 Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

61.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter dem geochemischen Milieu versteht man eine charakteristische Stoffumgebung, in der sich eine Substanz befindet oder eine Reaktion abspielt. Das geochemische Milieu im Grubenbau ist bestimmt durch die wässrige Lösung, die Festphasen und die Gase, die miteinander in Kontakt stehen.

61.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das geochemische Milieu im Grubenbau wird im Wesentlichen durch die geochemischen Charakteristika des Wirtsgesteins Steinsalz, die eingebrachten Abfälle und geotechnischen Barrieren geprägt. Es wird durch die auftretenden Lösungen, Festphasen und die Gase beeinflusst (Altmaier et al. 2004; Metz et al. 2003; RSK 2005):

- die wässrige Lösung wird durch die Konzentrationen der Haupt- und Spurenbestandteile, den pH-Wert, das Redoxpotential, die Ionenstärke und den Sättigungsgrad gegenüber den Festphasen (bzw. die jeweiligen chemischen Potentiale) definiert,
- die Festphasen des Wirtsgesteins, der Versatzstoffe, der Puffermaterialien und anderer technischer Barrierenmaterialien sowie
- die Gase (z. B. H_2) unter ihrem jeweiligen Partialdruck.

Durch Wechselwirkungen der Lösungen mit den eingebrachten Stoffen (Abfallprodukte, Versatzstoffe etc.) kommt es zu Veränderungen in lokalen geochemischen Milieus (z. B. in den Einlagerungsorten, Bohrlöcher oder Strecken). Auch Wechselwirkungen der Materialien von Schacht- und Streckenverschlüssen im Grubengebäude, sowie biotische und abiotische Stoffumsetzungen (z. B. thermochemische Sulfatreduktion) können das jeweilige geochemische Milieu verändern.

61.3 Sachlage am Standort

Zu erwartende Lösungen im Grubenbau am Standort Gorleben sind prinzipiell gesättigte bzw. nahezu gesättigte Lösungen des Systems der ozeanischen Salze (Na-K-Mg-

Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O). Typische Salzlösungszusammensetzungen des Standorts Gorleben wurden definiert und für experimentelle Untersuchungen verwendet (Kienzler & Loida 2001).

Falls die zutretende Lösungen nicht im Gleichgewicht mit dem anstehenden Salzgestein, eingebrachten Versatzstoffen und Gasphasen stehen, können Stoffe aufgelöst bzw. ausgefällt werden und so beispielsweise zu einer Veränderung des Hohlraumvolumens oder der Porosität beitragen.

Durch Wechselwirkungen der Lösungen mit Metallen, insbesondere den eingebrachten Stahlbehältern, wird im verschlossenen Grubenbau eine Wasserstoffbildung erwartet, die das geochemische Milieu in einen stark reduzierenden Zustand führt. Infolge von Reaktionen mit MgCl₂-reichen Salzlösungen können Abfallprodukte, wie beispielsweise HAW-Glas oder aluminiumhaltige Abfälle, eine pH-Absenkung der Lösung bewirken. Reaktionen von zementierten Abfallprodukten in NaCl- oder MgCl₂-reichen Salzlösungen können zu einem pH-Anstieg führen. Wechselwirkungen der Salzlösungen mit Baustoffen, die wesentliche Anteile an Sorelphasen enthalten, führen zu einem schwach-alkalischen Lösungs-pH.

Durch die thermochemische Sulfatreduktion wird Sulfid gebildet.

Die Einlagerung eines heterogenen Abfallspektrums führt zu lokal unterschiedlichen ausgeprägten geochemischen Milieus. Entsprechend der unterschiedlichen Stoffinventare in den geplanten Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle und in denjenigen für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung werden sich im West und Ostflügel des geplanten Endlagers unterschiedliche geochemische Milieus einstellen. Durch die Baumaterialien des Schachts wird dort ein anderes geochemisches Milieu erwartet.

61.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das geochemische Milieu bestimmt viele Prozesse bzw. wird von vielen Prozessen im Endlager beeinflusst. Es beeinflusst vor allem die Metallkorrosion, die Korrosion von Abfallmatrices und die damit einhergehende Gasbildung, Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfallgebänden, Ausfällung und Sorption von Radionukliden sowie (über die Metallkorrosion) den Ausfall der Behälter. Das geochemische Milieu wirkt sich auch

auf die Alteration von Schacht- und Streckenverschlüssen aus. So kann sich $MgCl_2$ -reiche Lösung durch Wechselwirkung mit Portlandzement-haltigen Stoffen (z. B. zementierte Abfallprodukte mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) in eine $CaCl_2$ -reiche Lösung umwandeln, die, falls sie in Kontakt mit anderen Stoffen gelangt, wiederum reagieren kann.

61.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

61.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

61.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

61.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

61.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Geochemische Milieu in einem Grubenbau stellt eine Randbedingung dar.

Wirkung: Das geochemische Milieu im Grubenbau ist per Definition in den Strecken und Schächten und im Nahfeld zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Es beeinflusst den Ablauf von Auflösungsprozessen und hat daher einen indirekten Einfluss auf die Initial-Barrieren.

61.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Begründungen:

Das geochemische Milieu wird im Grubenbau zu Beginn der Nachverschlussphase durch die Festphasen und Grubenluft bestimmt. Es stellt eine Randbedingung dar. Deshalb gibt es keine auslösenden FEP. Insbesondere durch Lösungen im Grubenbau wird das geochemische Milieu im Grubenbau beeinflusst.

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lösungen im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Zersetzung von Organika

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Wärmeproduktion

Gasmenge im Grubenbau

Radiolyse

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Thermochemische Sulfatreduktion

Komplexbildung

Advektion

Diffusion

Begründungen:

Lösungen im Grubenbau: diese Stoffklasse umfasst Komponenten des geochemischen Milieus.

Inventar: Metalle: diese Stoffklasse umfasst Komponenten des geochemischen Milieus.

Inventar: Organika: diese Stoffklasse umfasst Komponenten des geochemischen Milieus.

Inventar: Sonstige Stoffe: diese Stoffklasse umfasst Komponenten des geochemischen Milieus.

Auflösung und Ausfällung: Die Festphasen, Lösungen und Gase definieren die charakteristische Stoffumgebung. Einige Festphasen (z. B. Metalle, Zement, Organika) wirken direkt auf das geochemische Milieu, andere über die Prozesse Auflösung oder Korrosion.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: diese Alterationsprozesse beeinflussen den Lösungs-pH; die Alteration ist maßgeblich vom Lösungs-/Feststoffverhältnis abhängig.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Nicht-thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien haben gegenüber den o.g. Prozessen einen geringeren aber nicht vernachlässigbaren Einfluss auf das geochemische Milieu.

Metallkorrosion: diese Korrosionsprozesse beeinflussen u. a. durch Bildung eines hohen H_2 Partialdrucks und stark reduzierende Bedingungen.

Korrosion der Brennstoffmatrix: diese Korrosionsprozesse beeinflussen u. a. durch Änderung des Lösungs-pH (insbesondere im Fall von aluminiumhaltigen Brennstoffmatrices).

Korrosion von Glas: diese Korrosionsprozesse beeinflussen u. a. durch Änderung des Lösungs-pH (insbesondere bei Wechselwirkung mit $MgCl_2$ -reichen Lösungen) und die Freisetzung von Elementen der Glasmatrix (z. B. Silicium).

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: diese Korrosionsprozesse beeinflussen u. a. durch Änderung des Lösungs-pH.

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails: diese Korrosionsprozesse beeinflussen u. a. durch Änderung des Lösungs-pH.

Zersetzung von Organika: diese Umsetzungsprozesse beeinflussen u. a. durch Bildung von Lösungsspezies (z. B. $CO_3(2-)$, $HCO_3(-)$), Gasen (z. B. CO_2 , CH_4) und Änderung des Lösungs-pH.

Mikrobielle Prozesse im Grubenbau: diese Umsetzungsprozesse beeinflussen u. a. durch Bildung von Lösungsspezies (z. B. $CO_3(2-)$, $HCO_3(-)$), Gasen (z. B. CO_2 , CH_4) und Änderung des Lösungs-pH; mikrobielle Prozesse im Grubenbau katalysieren die Zersetzung von Organika und andere Prozesse

Wärmeproduktion: Die meisten geochemischen Reaktionen und die Sättigungsgrade der verschiedenen Festphasen sind temperaturabhängig. Daher ist weniger das FEP Wärmeproduktion, als vielmehr die resultierende Temperatur relevant.

Gasmenge im Grubenbau: diese Stoffklasse umfasst Komponenten des geochemischen Milieus.

Radiolyse: die strahlenchemische Zersetzung von Salzlösungen beeinflusst u. a. durch Bildung von molekularen und radikalischen Lösungsspezies (u. a. oxidative Spezies wie $ClO_3(-)$) und Gasen (z. B. H_2 , O_2).

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein: diese Stoffklasse umfasst Komponenten des geochemischen Milieus.

Thermochemische Sulfatreduktion: diese Umsetzungsprozesse beeinflussen durch die Reaktandenverbrauch (u. a. Sulfat) und Bildung von Produkten (u. a. Sulfide).

Komplexbildung : durch die Komplexbildung von Hauptlösungskomponenten wird ein direkter Einfluss auf das geochemische Milieu ausgeübt, z. B. Sulfidkomplexbildung von

Fe-Spezies, die das Redoxpotential bestimmen; indirekte Einflüsse auf das geochemische Milieu werden über Korrosions-, Alterations- und Zersetzungsprozesse ausgeübt.

Advektion: durch Advektionsprozesse werden unterschiedliche lokale geochemische Milieus miteinander gemischt; eine advektive Wegführung von Reaktanden ändert den Sättigungsgrad der Lösung bezüglich verschiedener Festphasen.

Diffusion: Ein direkter Einfluss der Diffusion auf das geochemische Milieu ist ähnlich demjenigen der Advektion. Das FEP Diffusion spielt für verschiedene Prozesse und in unterschiedlichen räumlichen Skalen eine Rolle. Die Prozesse/Skalen beinhalten beispielsweise:

- Diffusion von Ionen durch die Gelschicht (Glaskorrosion): unabhängig vom geochemischen Milieu.
- Diffusion von Wasser durch Korrosionsschichten bei Behälterkorrosion (Korrosionsschichten hängen vom geochemischen Milieu ab).
- Diffusion stellt Gleichgewichte ein (Ausfällung, Auflösung, diffusionskontrolliert oder kinetisch kontrolliert).
- Diffusion von Spaltprodukten an den Korngrenzen der Kernbrennstoffmatrix (dieser Diffusionsprozess trägt zur Instant Release Fraction bei).

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lösungen im Grubenbau

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Quellen des Bentonits

Auflösung und Ausfällung

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
Zersetzung von Organika
Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Verdampfen von Wasser
Radiolyse
Radionuklidmobilisierung
Sorption und Desorption
Kolloide
Komplexbildung
Diffusion

Begründungen:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Die Alterationsprozesse sind abhängig vom geochemischen Milieu, insbesondere den Konzentrationen an gelösten $\text{Cl}(-)$ und $\text{Mg}(2+)$ sowie abhängig von Wechselwirkungen zwischen Komponenten des geochemischen Milieus.

Nicht-thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Volumenänderungen in Baustoffen aus Sorelphasen sind abhängig vom geochemischen Milieu, insbesondere den Konzentrationen an gelösten $\text{Cl}(-)$ und $\text{Mg}(2+)$.

Lösungen im Grubenbau: Die Eigenschaften der Lösungen (z. B. Dichte) sind vom geochemischen Milieu abhängig.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Das geochemische Milieu beeinflusst vor allem Konvektionsströmungen.

Quellen des Bentonits: Das Quellen bzw. die Volumenänderung ist abhängig vom geochemischen Milieu, insbesondere den Konzentrationen an gelösten Kationen (u. a. $\text{Na}(+)$, $\text{K}(+)$, $\text{Mg}(2+)$, $\text{Ca}(2+)$).

Auflösung und Ausfällung : Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik (z. B. pH-kontrollierte Reaktionsraten) als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst; Auflösung und Ausfällung sind direkt abhängig von chemischen Potentialen der Komponenten des geochemischen Milieus, insbesondere vom Sättigungsgrad der Lösung gegenüber Festphasen.

Metallkorrosion: Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik (z. B. pH-kontrollierte Reaktionsraten) als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst; Korrosionsprozesse sind abhängig u. a. vom Redoxpotential und Sättigungsgrad der Lösung gegenüber den Metallen.

Korrosion der Brennstoffmatrix: Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik (z. B. pH-kontrollierte Reaktionsraten) als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst; Korrosionsprozesse sind abhängig u. a. vom Redoxpotential.

Korrosion von Glas: Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst; Korrosionsprozesse sind abhängig u. a. von der Lösungszusammensetzung (z. B. Si-Konzentration).

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst; Korrosionsprozesse sind direkt abhängig von pH-Wert, Konzentrationen an Hauptlösungskomponenten (u. a. Na(+), Mg(2+), Ca(2+)) und vom Sättigungsgrad der Lösung gegenüber Festphasen.

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails: Das Verhalten dieser Materialien wird sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst.

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Die Materialversprödung ist abhängig von Wechselwirkungen zwischen Komponenten des geochemischen Milieus, u. a. vom H₂-Partialdruck, von der H₂-Löslichkeit in Salzlösung, die wiederum durch die Lösungszusammensetzung beeinflusst wird.

Zersetzung von Organika: Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst, u. a. vom H₂-Partialdruck, der die Umsatzrate und die Reaktionsprodukte (CO₂ bzw. CH₄) beeinflusst.

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock : Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst, u. a. von der Ionenstärke und den Stoffmengen von Komponenten des ge-

ochemischen Milieus, z. B. den Nährstoffen organischen Kohlenstoffverbindungen, Sulfaten, Fe-haltigen Verbindungen.

Verdampfen von Wasser: der Dampfdruck der Salzlösungen ändert sich durch Änderungen im geochemischen Milieu, z. B. unterscheidet sich der Dampfdruck in konzentrierter NaCl-Lösung von demjenigen in Q-Lösung.

Radiolyse: Diese Prozesse werden durch verschiedene Komponenten des geochemischen Milieus beeinflusst, u. a. vom H_2 -Partialdruck und den Lösungskonzentrationen von Cl(-) und Br(-).

Radionuklidmobilisierung: Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst, u. a. von Konzentrationen der Haupt- und Spurenbestandteile der Lösungen, pH-Wert, Redoxpotential, Ionenstärke.

Sorption und Desorption: Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst, u. a. von Menge und Art fester Phasen, Konzentrationen der Haupt- und Spurenbestandteile in Lösung, pH-Wert, Redoxpotential, Ionenstärke.

Kolloide: Die Stabilität von Kolloiden wird u. a. durch die Konzentrationen der Hauptbestandteile der Lösungen bzw. der Dichte/Ionenstärke beeinflusst. Die Bildung von Actinid-Eigenkolloiden hängt außerdem von Redoxpotential und vom pH-Wert ab (z. B. sind vierwertige Actinid-Eigenkollide unter reduzierenden Bedingungen stabil).

Komplexbildung: Die Bildung von Komplexen wird in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst, u. a. Konzentrationen der Haupt- und Spurenbestandteile, pH-Wert, Ionenstärke.

Diffusion: siehe Begründung bei beeinflussenden FEP.

61.11 Offene Fragen

Entwicklung des geochemischen Milieus

– über lange Zeiträume

- Kopplung mit Transportprozessen
- bei Temperaturen über 25 °C (hohe Temperaturen im Einlagerungsbereich für wärmeentwickelnde Abfälle), sowie erhöhte Temperaturen durch einen Wärmeeintrag in den Einlagerungsbereich für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung möglich)

Weitere offene Fragen sind bei beeinflussenden und beeinflussten FEP behandelt (z. B. Komplexierung, Sorption, Auflösung und Ausfällung).

61.12 Literaturquellen

Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, B., Kienzler, B. Marquardt, C., Neck, V., Richter, A. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. - Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlussbericht, FZK-INE 002/04; Karlsruhe.

Kienzler, B., Loida, A. (2001): Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten - Charakterisierung und Bewertung - Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte. - Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651; Karlsruhe.

Metz, V., Kienzler, B., Schüßler, W. (2003): Geochemical evaluation of different groundwater - host rock systems for radioactive waste disposal. *Journal of Contaminant Hydrology*, 61 Jg., 265-279.

RSK - Reaktorsicherheitskommission (2005): Gase im Endlager, RSK-Stellungnahme 27. Dez. 2005, Bonn; <http://www.rskonline.de/downloads/sngaseendlager.pdf>

62 Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

62.1 Definition/Kurzbeschreibung

Durch Auflösung wird ein festes Material teilweise oder vollständig in Lösung gebracht. In Falle von Steinsalz findet eine kongruente Auflösung, im Falle von komplexen Salzmineralen bzw. von Abfallprodukten kann eine inkongruente Auflösung stattfinden. Bei Überschreiten von Löslichkeitsgrenzen von festen Phasen können Inhaltsstoffe der Lösungen, darunter auch Radionuklide aus der Lösung ausfallen.

62.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Ist eine Lösung bezüglich bestimmter Bestandteile untersättigt, können diese aus festen Stoffen nachgelöst werden. Im Fall einer Übersättigung der Lösung gegenüber (einer oder mehrerer) Festphase(n), können Lösungsbestandteile ausgefällt werden.

Verschiedene FEP (Metallkorrosion, Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen) sind mit Auflösungs- und Ausfällungsprozessen verbunden. Aus der Thermodynamik (Entropie) ergibt sich, dass jeder Stoff in jedem anderen Stoff eine gewisse Löslichkeit hat. Die Löslichkeit eines Stoffes gibt an, in welchem Umfang ein Reinstoff in einem Lösungsmittel (insbesondere Wasser) gelöst werden kann. Sie bezeichnet die Eigenschaft des Stoffes, sich unter homogener Verteilung (als Atome, Moleküle oder Ionen) im Lösungsmittel zu vermischen, d. h. zu lösen. Eine Unterscheidung zwischen löslich und unlöslich ist von den betrachteten Bedingungen abhängig. Es handelt sich also um relative Feststellungen wie schwer löslich, begrenzt löslich oder unbegrenzt löslich (mischbar) ein Stoff in einem anderen ist (z. B. Stumm & Morgan 1981). In einem Endlager befindet sich ein großes Spektrum an Stoffen. In Kontakt mit der vorhandenen Lösung gelangen Bestandteile dieser Stoffe in Lösung. Ihre Konzentration hängt u. a. von der Kinetik der Auflösung und Ausfällung der jeweiligen Materialien und der Durchmischung der Lösung ab. Die Maximalkonzentration der gelösten Stoffe im thermodynamischen Gleichgewicht wird durch das chemische Potential bestimmt, d. h. ihre Neigung, mit anderen Lösungsbestandteilen neue Verbindungen zu bilden, die dann als Festphasen ausfallen können. Das Löslichkeitsprodukt ist eine charakteristische Größe für jede Auflösungs- und Ausfällungsreaktion.

Das geochemische Milieu und die Temperatur beeinflussen die Auflösungs- und Ausfällungsprozesse (Altmaier et al. 2004). Gegenüber dem Einfluss des geochemischen Milieus und der Temperaturen ist der Einfluss des Drucks auf Auflösungs- und Ausfällungsprozesse vergleichsweise gering. Gesättigte Lösungen können bei einer Druck- oder Temperaturerhöhung oder -erniedrigung zusätzliche Salze lösen oder es können Ausfällungen auftreten. Die Prozesse finden solange statt bis ein thermodynamisches Gleichgewicht der Lösung mit den umgebenden Festphasen erreicht ist (Equilibrierung). Auflösung- und Ausfällungsprozesse können an allen Stellen des Endlagers stattfinden, an denen Lösungen mit Komponenten des Systems in Kontakt stehen können. Dies sind z. B.:

- im Wirtsgestein
- in den versetzten Strecken und Schächten
- an den Verschlussbauwerken
- an den Abfallgebänden
- im Kontakt mit den Abfallmatrices.

62.3 Sachlage am Standort

Ein Lösungszutritt ins Grubengebäude führt zu Auflösungs- und Ausfällungsprozessen bis die zutretende Lösung im Gleichgewicht mit den Lösungen und Feststoffen im Grubengebäude ist.

Durch den Kontakt der Lösungen mit dem Wirtsgestein Steinsalz ist zu erwarten, dass die Lösung mit den vorkommenden Mineralien (z. B. Halit) gesättigt sein wird. Für die Verschlussbauwerke ist dagegen nicht zu erwarten, dass sie sich im thermodynamischen Gleichgewicht mit den Lösungen im Endlager befinden. Die inkongruente Auflösung von Materialbestandteilen der Schacht- und Streckenverschlüsse unter Ausfällung neuer Festphasen ist daher möglich und wird bei einer Auslegung berücksichtigt.

Ein Kontakt der Abfallgebände mit den chloridreichen Lösungen führt zur Behälterkorrosion, die in Termen von Auflösungs- und Ausfällungsprozessen beschrieben werden kann.

Auch im Fall eines vollständigen thermodynamischen Gleichgewichts zwischen dem Wirtsgestein bzw. dem vorgesehenen Versatz und der Lösung können weitere Auflösungs- und Ausfällungsreaktionen stattfinden. Als Triebkraft für die Auflösungs- und Ausfällungsreaktionen gilt das chemische Potential, zu dem auch mechanische Spannungsspitzen (an Kristalliten) beitragen können.

62.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Allgemein können Schacht- und Streckenverschlüsse, Versatz oder Wirtsgestein durch Auflösungen für Fluide durchlässiger oder durch Ausfällungen (Krustenbildung) undurchlässiger werden. Durch Auflösungs- und Ausfällungsprozesse (Umlösung) anstehender Gesteine ändern sich die Feststoff- und Hohlraumvolumina des Endlagers, die mechanischen Eigenschaften des Gesteins sowie gegebenenfalls das geochemische Milieu.

Bei den Verschlussbauwerken müssen Auflösungs- und Ausfällungsprozesse bei der Bewertung ihrer Stabilität und Durchlässigkeit durch geeignete Wahl der Baumaterialien oder Dimensionierung berücksichtigt werden.

Die Löslichkeiten von Radionukliden in wässrigen Lösungen sowie die Raten der Auflösungs- und Ausfällungsprozesse von Radionuklidhaltigen Festphasen sind abhängig vom geochemischen Milieu. Im Fall einer Radionuklidmobilisierung kann für einige Radionuklide die Annäherung an Löslichkeitsgleichgewichte ein bedeutender Rückhalte-mechanismus darstellen.

Die Subrosion ist mit Auflösungs- und Ausfällungsprozessen an Evaporiten verbunden (Hutgesteinbildung). Des Weiteren werden die hydrochemischen Verhältnisse durch Auflösungs- und Ausfällungsprozesse maßgeblich bestimmt/verändert. Sämtliche Transportprozesse können dazu führen, dass Lösung in Kontakt mit Feststoffen kommt, die nicht mit diesen im Gleichgewicht steht und dadurch Auflösungs- und Ausfällungsprozesse auslöst.

62.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

62.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

62.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

62.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Wirtsgestein

62.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: In Anwesenheit von Lösung laufen permanent Auflösungs- und Ausfällungsprozesse ab und können alle Materialien im Endlagersystem betreffen.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist in allen Teilsystemen zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse haben eine direkte Einwirkung auf das Wirtsgestein sowie die Funktion der Initial-Barrieren (z. B. Dichtigkeit).

62.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Lösungen im Grubenbau

Begründungen:

Lösungen im Grubenbau: Bei Anwesenheit von Lösungen finden – auch im geochemischen Gleichgewicht – permanent Auflösungs- und Ausfällungsreaktionen statt.

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Versatz

Verschlussmaterial

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Wärmeproduktion

Verdampfen von Wasser

Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Komplexbildung

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe: Die vorhandenen Feststoffe bestimmen mögliche Auflösungs- und Ausfällungsprozesse.

Versatz: Die vorhandenen Feststoffe bestimmen mögliche Auflösungs- und Ausfällungsprozesse.

Verschlussmaterial: Die vorhandenen Feststoffe bestimmen mögliche Auflösungs- und Ausfällungsprozesse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Das geochemische Milieu ist eine wichtige Randbedingung für Auflösungs- und Ausfällungsprozesse. Diese Prozesse werden sowohl in der Reaktionskinetik (z. B. pH-kontrollierte Reaktionsraten) als auch in ihrem

Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst; Auflösung und Ausfällung sind direkt abhängig von chemischen Potentialen der Komponenten des geochemischen Milieus, insbesondere vom Sättigungsgrad der Lösung gegenüber Festphasen.

Wärmeproduktion: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse sind temperaturabhängig.

Verdampfen von Wasser: Verdampft eine wässrige Lösung, können Inhaltsstoffe ausfallen. Wirtsgestein: Die vorhandenen Feststoffe bestimmen mögliche Auflösungs- und Ausfällungsprozesse.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Beeinflusst die Auflösungsgeschwindigkeit von Steinsalz.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse sind direkt abhängig von chemischen Potentialen der Komponenten im Deck- und Nebengebirge, insbesondere vom Sättigungsgrad der Lösung gegenüber Festphasen.

Komplexbildung: Kann durch die Bildung neuer Verbindungen mit anderen Löslichkeiten zu Auflösungs- und Ausfällungsprozessen führen.

Bemerkungen:

Inventar: Metalle Inventar: Organika, Abfallmatrix: Der Auflösungsprozess wird über die entsprechenden Korrosionsprozesse bzw. Zersetzung von Organika bzw. Komplexbildung beschrieben.

Fluiddruck: Nennenswerte Einflüsse auf geochemische Prozesse haben i.A. Drucke größer 100 MPa. Für Reaktionen ohne Gase ist der Unterschied im relevanten Druckbereich kaum quantifizierbar. Daher sollte das FEP Fluiddruck im Zusammenhang mit geochemischen Prozessen nicht auftauchen.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Sedimentation

Diagenese

Subrosion

Versatz

Verschlussmaterial

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Porosität

Lösungen im Grubenbau

Kanalisation im Salzgrus

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Wirtsgestein

Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Thermomigration

Begründungen:

Sedimentation: Chemische Sedimente werden durch Ausfällungen aus wässrigen Lösungen gebildet.

Diagenese: Auflösungsprozesse oder Ausfällungen (Zementation) sind wichtige diagenetische Prozesse.

Subrosion: Auflösungsprozesse durch Grundwasser

Versatz: Durch teilweises Auslaugen (Auflösung) können Menge und Eigenschaften (z. B. Porosität) vom Versatz beeinflusst werden.

Verschlussmaterial: Durch Auflöse- und Ausfällungsprozesse kann Phasenbestand und Eigenschaften von Verschlussmaterial beeinflusst werden, beispielsweise Auflösung von Sorelphasen und Bildung von Brucit in alkalischen $MgCl_2$ -armen Lösungen.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Durch Auflöse- und Ausfällungsprozesse können der Phasenbestand und die Eigenschaften von Verschlussmaterial beeinflusst werden.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Auflösungen bzw. Auslaugungen im Salz können zum Absacken der Schottersäule führen.

Porosität: Auflösungsprozesse bzw. Ausfällungsprozesse können eine Änderung der Porosität mit sich führen.

Lösungen im Grubenbau: Hydratwasser kann durch Auflöseprozesse freigesetzt, durch Ausfällungen gebunden werden.

Kanalisation im Salzgrus: Durch Auflöse- und Ausfällungsprozesse können Kanalisierungen erweitert bzw. verkleinert werden.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Durch Auflösungs- und Ausfällungsprozesse ändert sich das geochemische Milieu.

Korrosion der Brennstoffmatrix: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse (z. B. von U-haltigen Sekundärphasen) sind wichtige Prozesse bei der Korrosion der Brennstoffmatrix.

Korrosion von Glas: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse (z. B. von Sekundärphasen wie Tonminerale, Baryt, Powellit) sind wichtige Prozesse bei der Korrosion der Glasmatrix.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Auflösungs- und Ausfällungsprozesse sind wichtige Prozesse bei der Korrosion, z. B. Auflösung von Zementhydratationsprodukten und Ausfällungen von Zementkorrosionsprodukten (z. B. Friedelsches Salz).

Wirtsgestein: Auflösungen bzw. Auslaugungen im Salz führen zur Hohlraumvergrößerung.

Thermomigration: Auflöse- und Ausfällungsprozesse sind Grundlage für Migration von Fluideinschlüssen.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Durch Auflöse- und Ausfällungsprozesse können der Phasenbestand und die hydraulische Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges beeinflusst werden.

62.11 Offene Fragen

- Einfluss von Spannungsänderungen auf Auflösungsprozesse
- Langzeitverhalten eines lösungsgefüllten Hohlraums im Steinsalz im Temperaturfeld der wärmeentwickelnden Abfälle
- Einfluss der Temperatur auf Auflösung und Ausfällung von radionuklidhaltigen Festphasen und Sekundärfestphasen

62.12 Literaturquellen

Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, B., Kienzler, B. Marquardt, C., Neck, V., Richter, A. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. - Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlussbericht, FZK-INE 002/04; Karlsruhe.

Stumm, W. Morgan, J.J. (1981): Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters. - John Wiley & Sons; New York.

63 Metallkorrosion (2.1.09.03)

63.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die (elektro-)chemische Reaktion von Metallen mit den Stoffen der Umgebung wird als Metallkorrosion bezeichnet. Die hier betrachteten Prozesse beziehen sich auf Reaktionen in Gegenwart von wässrigen Lösungen oder Wasserdampf.

63.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Umfang und Geschwindigkeit der Korrosion und die Zusammensetzung der Korrosionsprodukte sind im Wesentlichen von den Eigenschaften des Metalls (aktiv korrodierend z. B. unlegierter Stahl oder passivschichtbildend wie Edelstähle), der Temperatur und vom vorherrschenden geochemischen Milieu abhängig.

In der Technik werden unterschiedliche Arten der Korrosion anhand ihres Auftretens oder ihrer Ausprägung unterschieden:

- Kontaktkorrosion
- Lochfraßkorrosion
- Muldenkorrosion
- Flächenkorrosion
- Spannungsrisskorrosion
- Spaltkorrosion
- Interkristalline Korrosion
- Unterwanderungskorrosion

Vom chemischen Standpunkt bezeichnet Korrosion die chemische oder eine elektrochemische Reaktion eines Metalls mit Stoffen aus seiner Umgebung. Im Falle der Stahlkorrosion werden die Korrosionsreaktionen vom pH und der Verfügbarkeit von Sauerstoff (aerobe Korrosion/Säure oder Wasserstoffkorrosion) kontrolliert. Unter Sauerstoffmangel führt die Korrosion von Stahl zur Bildung von Wasserstoff. Die bei der Metallkorrosion entstehende Gasphase besteht überwiegend aus $H_2(g)$, wodurch redu-

zierende Bedingungen stabilisiert werden. Die entstehenden Korrosionsprodukte hängen von der Zusammensetzung des Metalls, dem vorherrschenden geochemischen Milieu und der Temperatur ab. Die Korrosionsgeschwindigkeit hängt von der Art und der Vorbehandlung des Metalls, der Verfügbarkeit von Sauerstoff und der Temperatur ab. Im Falle von niedrig legierten Stählen ist die aerobe Korrosionsrate um Größenordnungen schneller als die anaerobe Korrosionsrate.

63.3 Sachlage am Standort

Die im Endlager eingebrachten Metallmengen sind im FEP Inventar: Metalle beschrieben.

Der im verschlossenen Endlager vorhandene Luftsauerstoff wird schnell durch aerobe Korrosionsreaktionen an Behältermaterialien und sonstigen eisenhaltigen Bergwerkeinrichtungen verbraucht. Danach finden nur noch anaerobe Korrosionsprozesse bei Anwesenheit von Wasser unter Bildung von Wasserstoffgas statt. Dabei wird Wasser verbraucht und Salze kristallisieren aus. Das Ausmaß der Korrosion ist entsprechend den verfügbaren Lösungsmengen begrenzt. Verfügbare Lösungsmengen sind die Versatz- und Gebirgsfeuchte im Nahfeld bzw. gegebenenfalls zutretende Lösungsmengen. Ausmaß und Kinetik der Metallkorrosion werden durch den FEP geochemisches Milieu maßgeblich beeinflusst. So können Sulfidlösungsspezies, die durch Sulfatreduktion gebildet werden, die Metallkorrosionsrate erhöhen und zur Ausfällung von Metallsulfiden führen. Sowohl flächenhafte Korrosion, als auch Lochfraß wurden für die am Standort Gorleben geplanten Behältermaterialien und Salzlösungen untersucht (European Commission 2004, Smailos, 1993, 2002; Smailos et al. 1992, 1999, 2003) und Korrosionsraten für verschiedenen geochemischen Bedingungen abgeleitet. Neben Stählen korrodieren auch andere, im Endlager verbliebene metallische Werkstoffe (Al-, Cu-, Ni- und andere Legierungen).

Die Korrosion von CSD-C-Abfällen (Zircaloy, Strukturteilen) und metallische Komponenten nicht-wärmeproduzierender Abfälle führen direkt zu einer Radionuklidmobilisierung.

63.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Durch Restluft und Restfeuchte setzt unmittelbar nach Einlagerung unter oxidierenden Bedingungen eine Korrosion der Stahlbehälter sowie der nach dem Bergwerksbetrieb in den Strecken verbliebenen Metalle ein. Der Sauerstoff der Restluft wird im Wesentlichen durch die Bildung von Eisenoxiden und hydroxidischen Eisenfestphasen aufgezehrt. Bei niedrig-legierten Stählen wie den Brennelement-Innenbehältern sowie bei äußeren Brennelement-Außenbehältern (GGG40) wird ein als aktiver Korrosionsprozess bezeichneter Reaktionsverlauf beobachtet, bei welchem Eisen zu Eisenoxid/hydroxid reagiert. In zahlreichen Experimenten wurde gezeigt, dass die aktive Korrosion der unlegierten Stähle flächenhaft und mit weitgehend konstanter Rate verläuft (Smailos 1993, Smailos et al. 1992, 1999, 2003). Weitere Details sind in den FEP Brennelement-Behälter und Sonstige Endlagerbehälter beschrieben.

Bei passivierten Edelstählen, insbesondere in einer chloridhaltigen Lösung, treten an Fehlstellen der aus Oxiden bestehenden Passivschicht häufig punktförmige Korrosionsprozesse (Lochfraß) auf. An diesen Fehlstellen wird der Sauerstoff aus der Oxidschicht durch Chloridionen verdrängt. Durch weitere Anlagerung von Chloridionen entsteht ein Bereich auf der Oberfläche des Metalls, der nicht mehr durch eine Oxidschicht geschützt ist. Diese Stelle bietet nun einen Angriffspunkt für Korrosion. Unter den zu erwartenden anaeroben Bedingungen im Endlager ist kaum Sauerstoff verfügbar, der zur Repassivierung beitragen könnte. Aufgrund von Diffusionsprozessen im Loch bildet sich ein Konzentrationselement aus: Das Loch bildet die Anode, die restliche Oberfläche die Kathode. Da die Korrosionsgeschwindigkeit durch das Flächenverhältnis von Kathode zu Anode bestimmt wird, schreitet die Reaktion mit großer Geschwindigkeit im Loch voran. Im Loch entstehen durch Hydrolyse Protonen, die die Lösung im Loch ansäuern. Durch den erniedrigten pH-Wert erhöhen sich das freie Korrosionspotential und damit die Korrosionsgeschwindigkeit im Loch.

Die Metallkorrosion beeinflusst das geochemische Milieu. Im weiteren Verlauf einer anaeroben Metallkorrosion wird zunehmend H_2 gebildet und es stellen sich stark reduzierende Bedingungen ein. Die Bildung von Metallkorrosionsprodukten (z. B. Oxide und Sulfide) beeinflussen den pH und die Konzentrationen von Lösungskomponenten. Der Lochfraß kann schneller als die flächenhafte Korrosion zu einer durchgehenden Beschädigung des Behälters führen, wodurch Lösung in den Behälter eindringen kann und eine Mobilisierung von Radionukliden erfolgen kann (siehe FEP Radionuklidmobilisierung).

Die Korrosion verringert die mechanische Stabilität der Behälter gegenüber der Gebirgskonvergenz.

Durch Redoxreaktionen von Radionukliden an der Oberfläche eines korrodierenden Behälters oder eines Eisengegenstandes kann die Löslichkeit der Radionuklide sinken (Grambow, Loida et al. 1996). Korrosionsprodukte wie Magnetit oder Eisen(II)-Hydroxide besitzen auch in NaCl-reichen bzw. in Mg-reichen Salzlösungen gute Sorptionseigenschaften für Radionuklide.

63.5 Zeitliche Beschränkung

Die aerobe Korrosion verläuft in der Regel sehr schnell, so dass nach wenigen Jahren O₂ quantitativ verbraucht ist und die aerobe Korrosion abgeschlossen ist. Anaerobe Korrosion hat keine zeitliche Beschränkung, solange die Edukte der Korrosionsreaktionen nicht aufgebraucht werden.

63.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

63.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

63.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Brennelement-Behälter

63.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung in den Teilsystemen: Im Nahfeld und den übrigen Strecken und Schächten sind sowohl Metalle (Abfallbehälter, Bergwerkseinrichtungen, Anker etc.) als auch geringe Feuchtigkeitsmengen vorhanden, insofern ist das Eintreten dieses Prozesses in diesen Teilsystemen zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Eine Beeinträchtigung auf die Funktion der Initial-Barrieren ist durch die Korrosion der BE-Behälter gegeben. Durch die Korrosion der BE-Behälter verändern sich deren Dichthaltigkeit und Rückhalteeigenschaften.

63.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versagen eines Brennelement-Behälters

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Wärmeproduktion

Diffusion

Begründungen:

Inventar: Metalle: Einfluss der Metallmengen auf die Metallkorrosion.

Abfallmatrix: Einfluss der Materialien der metallischen Abfallmatrices auf deren Korrosion.

Brennelement-Behälter: Behälter enthalten Metalle.

Sonstige Endlagerbehälter: Behälter enthalten Metalle.

Versagen eines Brennelement-Behälters: Das Versagen beeinflusst den Verlauf der Metallkorrosion im Innern des Behälters.

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Der Ausfall beeinflusst den Verlauf der Metallkorrosion im Innern des Behälters.

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften: Bergwerkseinrichtungen, Anker etc. enthalten Metalle, deren Zusammensetzung und Platzierung die Metallkorrosion beeinflussen.

Bohrlochverrohrung: Die Bohrlochverrohrung enthält Metalle.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Der Ausfall beeinflusst den Verlauf der Metallkorrosion im Innern der Bohrlochverrohrung.

Lösungen im Grubenbau: Bilden eine wesentliche Voraussetzung für Korrosionsprozesse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Wichtige Randbedingung für Korrosionsprozesse.

Auflösung und Ausfällung: Diese Prozesse sind wichtig während der Korrosion.

Wärmeproduktion: Korrosionsprozesse sind temperaturabhängig.

Diffusion: Diffusionsprozesse steuern das Fortschreiten der Metallkorrosion.

Bemerkungen:

Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses: Beeinflusst indirekt über Lösungen im Grubenbau.

Radiolyse: Wirkt auf die Korrosionsprodukte, wird indirekt über das geochemische Milieu beeinflusst.

Resultierende FEP:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Gasbildung

Begründungen:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Bei Korrosionsprozessen wandeln sich die Metalle der Behältermaterialien in Oxide mit größerem Volumen um.

Gasbildung: Metallkorrosion geht mit der Bildung von Gasen (Wasserstoff) einher.

Bemerkungen:

Wärmeproduktion: Ist gegenüber der Zerfallswärme aus den radioaktiven Abfälle vernachlässigbar.

Beeinflusste FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Inventar: Metalle

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versagen eines Brennelement-Behälters

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Lösungen im Grubenbau
Geochemisches Milieu im Grubenbau
Radionuklidmobilisierung
Sorption und Desorption
Kolloide

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Gegebenenfalls noch im Bohrloch vorhandene Metallteile können bei Korrosion zu Wegsamkeiten beitragen.

Inventar: Metalle: Durch Korrosionsprozesse werden Metalle zu Sekundärphasen (z. B. Oxide, Chlorhydroxide) und aquatische Metallspezies (z. B. $\text{Fe}(2+)/\text{Fe}(3+)$, $\text{Al}(3+)$) umgewandelt; dadurch wird das Metallinventar verringert.

Abfallmatrix: Metallkorrosion beeinflusst kontaminierte (kompaktierte) Metallteile.

Brennelement-Behälter: Die Stabilität von Brennelement-Innenbehältern (aus niedrig-legierten Stählen) und den äußeren Brennelement-Außenbehältern (aus GGG40) wird durch aktive Korrosionsprozesse beeinflusst, die Stabilität von HAW-Glaskokillen (aus Edelstahl) wird durch Lochfraß beeinflusst; durch Metallkorrosion verlieren die Behälter ihre Dichtigkeit.

Sonstige Endlagerbehälter: Die Stabilität wird durch aktive Korrosionsprozesse beeinflusst, die Stabilität von HAW-Glaskokillen (aus Edelstahl) wird durch Lochfraß beeinflusst; durch Metallkorrosion verlieren die Behälter ihre Dichtigkeit.

Versagen eines Brennelement-Behälter: Die Metallkorrosion kann zur Undichtigkeit führen.

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Fortschreitende Metallkorrosion kann zu einem Ausfall von Behältern führen.

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften: metallische Einrichtungen werden durch Metallkorrosion umgesetzt.

Bohrlochverrohrung: Die Stabilität einer Bohrlochverrohrung (aus niedrig-legierten Stählen) wird durch aktive Korrosionsprozesse beeinflusst.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Fortschreitende Metallkorrosion kann zu einem Ausfall einer Bohrlochverrohrung führen.

Lösungen im Grubenbau: Lösungsmengen werden durch die Metallkorrosion verringert.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Korrosionsprozesse beeinflussen das geochemische Milieu im Grubenbau; diese Korrosionsprozesse beeinflussen u. a. durch Bildung eines hohen H_2 -Partialdrucks und stark reduzierende Bedingungen.

Radionuklidmobilisierung: Bei kompaktierten Strukturteilen (CSD-C) werden bei der Metallkorrosion direkt Radionuklide mobilisiert.

Sorption und Desorption: Die Produkte der Metallkorrosion zeichnen sich durch gute Sorptionseigenschaften aus.

Kolloide: Hydroxidische Fe-Korrosionsprodukte können durch Abrasion Kolloide bilden, z. B. $Fe(OH)_2$ -Kolloide.

Bemerkungen:

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Die Auswirkungen des bei der Metallkorrosion gebildeten Wasserstoffes werden indirekt über Gasbildung und Gasmenge im Grubenbau beschrieben.

63.11 Offene Fragen

- Berücksichtigung lokaler Korrosionseffekte
- Berücksichtigung mikrobiell beeinflusster Korrosionsvorgänge
- Einfluss von Temperaturänderungen auf Metallkorrosion
- Bildung von stabilen Metallkorrosionsprodukten in Salzlösungen
- Beeinflussung des geochemischen Milieus (insbesondere pH und Redoxbedingungen) durch Metallkorrosion und Bildung von Korrosionsprodukten
- Kinetik der Metallkorrosion unter Strahlung (relevant für HAW-Glasprodukte)

63.12 Literaturquellen

European Commission, Nuclear Science and Technology (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project). - Final Report, EUR 20621 EN: 155-161.

Grambow, B., Loida, A., Smailos, E. (1996): Langzeitstabilität von Abfallgebinden und abgebranntem Kernbrennstoff gegenüber Korrosion unter Endlagerbedingungen. Direkte Endlagerung; Sammlung der Vorträge anlässlich der Abschlussveranstaltung am 7. und 8. Dezember 1995 in Karlsruhe. - FZK, Technik u. Umwelt, PTE, Wiss. Ber., FZKA-PTE Nr. 2: 213-267, 13 Abb.; Karlsruhe.

Smailos, E. (1993): Corrosion of high-level waste packaging materials in disposal relevant brines, Nuclear Technology, vol. 104: 343-350.

Smailos, E. (2002): Influence of gamma radiation on the corrosion of carbon steel, heat-generating nuclear waste packaging in salt brines. IAEA TECDOC-1316, IAEA; Wien.

Smailos, E., M. A. Cunado, I. Azkarate, B. Kursten., G. Marx (2003): Long-term performance of candidate materials for HLW/spent fuel disposal containers. – Forschungszentrum Karlsruhe Wissenschaftliche Berichte, FZKA-6809.

Smailos, E., A. Martínez-Esparza, B. Kursten, G. Marx., I. Azkarate (1999): Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers. - Forschungszentrum Karlsruhe FZKA 6285, 04/1999.

Smailos, E., W. Schwarzkopf, R. Koste, K. H. Gruenthaler (1992): Advanced corrosion studies on selected packaging materials for disposal of HLW canisters in rock salt, in Corrosion Problems Related to Nuclear Waste Disposal: A Working Party Report, European Federation of Corrosion, Ed.: The Institute of Materials: 23-31.

64 Korrosion der Brennstoffmatrix (2.1.09.04)

64.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Korrosion der Brennstoffmatrix beschreibt die chemische Umsetzung der Matrices ausgedienter Brennelemente (z. B. UOX, MOX, HTR-Brennelemente) durch Lösungen.

64.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Kernbrennstoffe von UO_2 und MOX-Brennelementen sowie der BISO-, TRISO-, U_3Si_2 -/ UAl_x -Al-Brennstoffe von Prototyp- und Forschungsreaktoren korrodieren bei Anwesenheit von wässrigen Lösungen. Eine nennenswerte Korrosion der Brennstoffe und die damit verbundene Radionuklidmobilisierung können erst beginnen, wenn Lösungen an die Brennstoffe gelangen (siehe FEP Versagen eines Brennelement-Behälters und Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters).

Bei Kontakt wässriger Lösung mit Kernbrennstoff finden in der Lösung radiolytische Prozesse statt, die zur Bildung oxidierender und reduzierender Radiolyseprodukte führen. Aus UO_2 - und MOX-Kernbrennstoff wird zunächst die sogenannte instant release fraction, IRF, freigesetzt, d. h. ein leicht löslicher Spaltproduktanteil (z. B. Spaltgase, Cs-137, Cs-135 und I-129) im Ringspalt und Plenum des Brennstabs, auf Bruchflächen und auf Korngrenzen. Im Unterschied zu den Radionuklidanteilen der IRF, sind die Actiniden, die langfristig die Radiotoxizität der Brennelemente dominieren, in der UO_2 -Matrix der Brennstoffkörner eingebunden. Das Ausmaß der Brennstoffkorrosion und Radiolyse werden erheblich durch die Dosisleistung der Brennelemente und das geochemische Milieu bestimmt. Mit zunehmendem Alter des bestrahlten Kernbrennstoffs und der damit abnehmenden Dosisleistung verringert sich signifikant die Korrosionsrate gegenüber frisch bestrahlten Kernbrennstoff. Unter reduzierenden Bedingungen (charakterisiert durch sehr niedrige O_2 -Konzentrationen und/oder hohe H_2 -Konzentrationen in Lösung) korrodiert Kernbrennstoff langsamer (Bruno & Ewing, 2006, Johnson et al. 1988, Kienzler et al. 2012, Shoesmith 2000).

64.3 Sachlage am Standort

Des zeitliche Ablauf und die Raten der Radionuklidmobilisierung und der Korrosion der UO_2/MOX -Matrix sind unterschiedlich zu bewerten:

Die Korrosion der Kernbrennstoffmatrix setzt unter den zu erwartenden Bedingungen dann ein, wenn durch die Behälterkorrosion der Luftsauerstoff verbraucht ist und sich durch die anaerobe Korrosion reduzierende Bedingungen eingestellt haben. Die Korrosionsrate der Brennstoffmatrix hängt im Wesentlichen vom Abbrand und dem Alter des Brennstoffs, dem Strahlungsfeld bzw. dem Radionuklidinventar, dem H_2 -Gehalt, dem geochemischen Milieu und dem Gehalt von strahlenchemisch aktiven Spurenkomponenten der zutretenden Lösung (z. B. Bromid und Hydrogencarbonat) ab. Die Temperatur und die makroskopischen Eigenschaften der Lösungen spielen eine geringere Rolle. Die Radionuklidinventare wurden durch Abbrandrechnungen abgeschätzt (Peifer et al. 2011).

Chemisch induzierte Veränderungen können nur bei ausreichender Lösungsmenge entstehen. In Anwesenheit von H_2 nimmt die Korrosionsrate mit zunehmendem H_2 -Partialdruck ab (Wasserstoff-Inhibitionseffekt). Dies kann jedoch durch Spurenkomponenten (z. B. $\text{Br}(-)$) wieder aufgehoben werden.

Die Korrosion der Brennstoffmatrix, das Radionuklidverhalten und radiolytische Prozesse in Salzlösungen wurden im Rahmen des Gorleben-Radionuklidquellterm Projekts untersucht und bewertet (z. B. Loida et al. 1999a, 1999b, Ergebnisse sind in Kienzler et al. 2000, 2012 zusammengefasst). Die Untersuchungen zeigten, dass bei einem H_2 -Überdruck die Konzentrationen an gelöstem Uran signifikant reduziert im Vergleich zu anaeroben oder oxidischen Bedingungen sind. Eine H_2 -kontrollierte Inhibierung der Freisetzung Matrix-gebundener Spaltprodukte, wie Sr-90, wird durch den $\text{Br}(-)$ Gehalt der salinaren Lösungen stark beeinträchtigt (Metz et al. 2008). Im Vergleich zur Korrosion von UOx - und MOX -Brennstoffen werden U_3Si_2 -/ UAl_x -Al-Brennstoffe von Prototyp- und Forschungsreaktoren in Salzlösungen sehr schnell umgesetzt (Mazeina et al. 2003).

64.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch Korrosion der Brennstoffmatrix können Radionuklide in Lösung gehen. Die Auswirkungen der Korrosion der Brennstoffmatrix sind vom Typ des Brennstoffs (UO_2 -/MOX-/ U_3Si_2 /UAl_x-Al-Matrices) und dem geochemischen Milieu abhängig. Die Korrosion beeinflusst und besonders im Fall von Aluminium-haltigen Brennstoffmatrices den Lösungs-pH und das geochemische Milieu.

64.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Eine Korrosion der Brennstoffmatrix kann aber erst einsetzen, wenn ausreichende Lösungsmengen vorhanden sind. Solange beta- und gamma-Emitter das Strahlungsfeld dominieren, wird die Korrosion von UO_2 -/MOX-Matrices durch beta- und gamma-Radiolyse kontrolliert. Durch den Zerfall der kurzlebigeren beta- und gamma-Emitter innerhalb einiger hundert Jahre wird die Korrosion von UO_2 -/MOX-Matrices zunehmend durch alpha-Radiolyse kontrolliert; langfristig wird die Brennstoffmatrixkorrosion durch die chemische Affinität kontrolliert.

64.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

64.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

64.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

64.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Unter der Voraussetzung, dass Lösung zu den Abfällen gelangt ist, ist dieser Prozess wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Per Definition nur im Nahfeld zu betrachten

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Eine Beeinflussung auf die Funktion der Initial-Barrieren ist über mehrere FEP gegeben. Eine Beeinflussung über mehr als eine Ebene wird gemäß der prinzipiellen Vorgehensweise für FEP-Beschreibungen als nicht zutreffend klassifiziert. Die Brennstoffmatrix wird nicht als Initial-Barriere betrachtet.

64.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Abfallmatrix

Versagen eines Brennelement-Behälters

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Wärmeproduktion

Radiolyse

Diffusion

Begründungen:

Abfallmatrix: Das verwendete Matrixmaterial und deren Eigenschaften ist eine Randbedingung für die Korrosion.

Versagen eines Brennelement-Behälters: Erst nach einem Behälterausfall können größere Mengen an Lösungen an die Matrix gelangen.

Lösungen im Grubenbau: Sind eine wichtige Voraussetzung für Korrosionsprozesse

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Korrosionsprozesse sind abhängig vom geochemischen Milieu und der Temperatur.

Auflösung und Ausfällung: Diese Prozesse sind von elementarer Bedeutung bei der Korrosion.

Wärmeproduktion: Temperaturabhängigkeit der Korrosion

Bemerkungen:

Radiolyse: Der Einfluss der Radiolyse auf die Korrosionseigenschaften der Brennstoffmatrix erfolgt indirekt über die Abfallmatrix

Resultierende FEP:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Gasbildung

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung: Eine Korrosion von UO_2 -/MOX-Matrices führt zu Produkten mit einem höheren Volumen.

Gasbildung: Bei der Korrosion von Aluminium haltigen Matrices entstehen Gase.

Radionuklidmobilisierung: Bei der Korrosion der Matrices werden Radionuklide freigesetzt.

Beeinflusste FEP:

Abfallmatrix

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Begründungen:

Abfallmatrix: Das Inventar und die Eigenschaften (z. B. Aufbau) der Brennstoffmatrix ändern sich durch die Korrosion.

Lösungen im Grubenbau: Durch die Korrosionsprozesse und nachfolgende Bildung von Sekundärphasen wird Lösung verbraucht.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Diese Korrosionsprozesse beeinflussen (insbesondere im Fall von Aluminium-haltigen Brennstoffmatrices) den Lösungs-pH.

64.11 Offene Fragen

- Einfluss der Radiolyse auf das Redoxpotential und somit auf die Korrosion der Brennstoffmatrix für lange Zeiträume
- Einfluss der Temperatur auf die Korrosion der Brennstoffmatrix
- Einfluss von H₂, strahlenchemisch aktiver Lösungskomponenten und vom Redoxpotential auf die Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von MOX-Brennstoff unter salinaren Bedingungen
- Korrosion von Brennstoffen aus Forschungs- und Prototypreaktoren

64.12 Literaturquellen

Bruno J., Ewing R. C. (2006): Spent nuclear fuel. Elements 2: 343-349.

Johnson, L., Shoesmith, D.W. (1988): Spent Fuel. In: W. Lutze, Ewing, R. (Hrsg.), Radioactive Waste Forms for the Future. Elsevier North Holland; Amsterdam.

Kienzler, B., Schüssler, W., Metz, V. (2000): Quellterme für HAW-Glas, abgebrannten Kernbrennstoff und zementierte Abfälle. - Zusammenfassender Bericht, INE/FZK 05/00; Karlsruhe.

Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V. (2012): Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste), Als Bericht KIT-INE 003/11 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, KIT-SR 7624, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE); Karlsruhe

Loida, A., Grambow, B., Kelm, M. (1999a): Abgebrannter LWR-Kernbrennstoff: Auslaugverhalten und Freisetzung von Radionukliden - FZK-INE 009/99; Karlsruhe.

Loida, A., Luckscheiter, B., Kienzler, B. (1999b): Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement. - FZK-INE 012/99; Karlsruhe.

Mazeina, L., H. Curtius, J. Fachinger, R. Odoj (2003): Characterisation of secondary products of uranium-aluminium material test reactor fuel element corrosion in repository-relevant brine. *J. Nucl. Mater.* 321: 1-7.

Metz, V., Loida, A., Bohnert, E., Schild, D., Dardenne, K. (2008): Effects of hydrogen and bromide on corrosion of spent nuclear fuel and gamma-irradiated $\text{UO}_2(\text{s})$ in NaCl brine. *Radiochimica Acta* 96: 637-648.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Shoosmith D. W. (2000): Fuel corrosion processes under waste disposal conditions. *Journal of Nuclear Materials* 282: 1-31.

Weiterführende Literatur:

Carbol, P., Fors, P., Gouder, T., Spahiu, K. (2009): Hydrogen suppresses UO_2 corrosion. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73: 4366-4375.

Eriksen, T., Shoesmith, D. W., Jonsson, M. (2012): Radiation induced dissolution of UO_2 based nuclear fuel - A critical review of predictive modelling approaches. Journal of Nuclear Materials 420: 409-423.

65 Korrosion von Glas (2.1.09.05)

65.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die chemische Zersetzung der Borosilikatmatrix durch Wechselwirkungen mit Lösungen wird als „Korrosion von Glas“ bezeichnet.

65.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Korrosion von Glas behandelt die Auflösung oder Umwandlung der strukturellen Glasmatrix. Eine Korrosion der Glasmatrix und die damit verbundene

Eine Radionuklidmobilisierung kann erst dann beginnen, wenn Lösungen an die Glasmatrix gelangen.

Bei der Korrosion von Glas treten unterschiedliche Prozesse sowohl parallel als auch konsekutiv auf. Zunächst erfolgt die Benetzung der Oberflächen und Diffusionsprozesse von Wasser in die Matrix bzw. von leichtlöslichen Elementen (z. B. Li, Na) aus der Matrix in die Lösung (Ionenaustausch). In bestimmte Kanäle, die im CSD-V-Glas/HAW-Glas durch den hohen Gehalt an Netzwerk-Modifier Elementen (insbesondere Spaltprodukte) gebildet werden, können z. B. Mg-Ionen in die Glasmatrix eindringen. SiO₂ reichert sich an der Oberfläche des Glases an und bildet mit den Komponenten der anstehenden Lösung neue feste Phasen mit tonartigen Eigenschaften (Gelschicht). Innerhalb der Gelschicht können schwerlösliche Radionuklidphasen ausfallen sowie Sorptionsprozesse auftreten. Die Korrosion von Glas ist maßgeblich vom geochemischen Milieu, sowie der Temperatur abhängig. Ein Modell zur Beschreibung der Korrosion von Glas wurde von B. Grambow entwickelt (z. B. Grambow, 1997, 2006).

Die Reaktion zwischen Borosilikatgläsern mit wässrigen Lösungen wird im Allgemeinen als Kombination zweier scheinbar unabhängiger Prozesse angesehen: die anfängliche, als Ionenaustauschprozess beschreibbare, diffusionskontrollierte Freisetzung von Alkalionen aus der Glasmatrix und die Auflösung der Glasmatrix selbst. Wegen des hohen Gehalts an schwerlöslichen Metallionen wird korrodiertes HAW-Glas nicht wie die Alkalisilikatgläser vollständig aufgelöst, sondern der korrodierte Teil des Glases wandelt sich in sekundäre Mineralphasen um, die den Raum ausfüllen, an dem sich vorher die Glasphase befand. Durch Reaktionen des gelösten Silikats mit Lösungsbestandteilen

bilden sich Korrosionsschichten auf der Glasoberfläche aus, welche tonartige Mineralphasen enthalten.

65.3 Sachlage am Standort

Die Korrosion von Glas in CSD-V und CSD-B Kokillen ist ein wesentlicher Prozess im Hinblick auf die Radionuklidmobilisierung (siehe FEP Radionuklidmobilisierung). Die beiden FEP sind daher bei der Beschreibung der Sachlage am Standort Gorleben und den standortspezifischen Auswirkungen nicht eindeutig voneinander zu trennen.

Die Zusammensetzung der Glasmatrix wird in Peiffer et al. (2011) beschrieben. Die Korrosion der Glasmatrix in Salzlösungen führt zu einer Änderung des pH-Werts um mehrere Einheiten und zu einer Zunahme der Siliziumkonzentration in der Lösung. In $MgCl_2$ -reichen Salzlösungen nimmt der pH infolge der Glaskorrosion stark ab, in $NaCl$ -Lösung dagegen zu. Nach Erreichen der Sättigungskonzentration für Silizium sinkt die Korrosionsrate deutlich ab. Die anfängliche Rate der Glaskorrosion bis zum Erreichen der Siliziumsättigung ist vor allem von der Lösungszusammensetzung, der Kinetik der simultan ablaufenden Ausfällungsprozesse, dem pH-Wert und der Temperatur abhängig. Die Dauer bis zum Erreichen der Si-Sättigung hängt auch von der Lösungsmenge (z. B. im Bohrloch), dem Si-Gehalt der Lösungen (z. B. bei Einsatz von Sand in der Bohrlochverrohrung) und der Größe der Glasoberfläche ab. Die tatsächliche Glasoberfläche wird beeinflusst ihr Alter und durch mechanische Vorbelastungen wie Stoß oder Druck.

65.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Durch Korrosion von Glas können die eingeschlossenen Radionuklide in Lösung gehen. Dies wird im FEP Radionuklidmobilisierung beschrieben. Die Auswirkungen der Korrosion sind vom geochemischen Milieu und der Temperatur abhängig. In $MgCl_2$ -reichen Lösungen führt Glaskorrosion zu einer Versauerung, d. h. niedrigen pH-Werten und somit zu veränderten Löslichkeiten der Radionuklide. Infolge von pH-Änderungen wird innerhalb der Kokillen die Behälterkorrosion verstärkt (im Fall von $MgCl_2$ -reichen Lösungen) oder abgeschwächt (im Fall von konzentrierten $NaCl$ -Lösungen). Die Ausfällung von Sekundärphasen bei der Glaskorrosion kann auch zu einer Rückhaltung der Radionuklide beitragen.

65.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

65.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

65.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

65.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

65.9 Begründungen:

Eintrittswahrscheinlichkeit: Unter der Voraussetzung, dass ein Behälterausfall stattgefunden hat und Lösung zu den Abfällen gelangt ist, ist dieser Prozess wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Per Definition nur im Nahfeld zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Glasmatrix zählt, wie auch die anderen Abfallmatrices, nicht zu den Initial-Barrieren.

65.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Wärmeproduktion

Diffusion

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe: Stellt die Menge an vorhandenem Silikat im Endlager dar.

Abfallmatrix: Die Glasmatrix (Aufbau) ist eine Randbedingung für die Korrosion.

Behälterausfall: Erst nach einem Behälterausfall können größere Mengen an Lösungen an die Matrix gelangen.

Lösungen im Grubenbau: Sind eine Voraussetzung für Korrosionsprozesse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Bestimmt den Ablauf der Korrosion.

Auflösung und Ausfällung: Wichtige Prozesse bei der Korrosion (Gelschichtaufbau).

Wärmeproduktion: Temperaturabhängigkeit der Korrosion.

Diffusion: Ionenaustauschprozesse beruhen auf der Diffusion.

Resultierende FEP:

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Nicht-thermisch induzierte Volumenänderung: Die bei der Korrosion von Glas entstehenden Sekundärphasen (z. B. Tonminerale) haben ein größeres Volumen als das Glas.

Radionuklidmobilisierung: Bei der Korrosion der Matrices werden Radionuklide freigesetzt, können aber auch in Sekundärphasen zurückgehalten werden.

Bemerkungen:

Gasbildung: Bei der Korrosion von Glas entstehen keine Gase.

Beeinflusste FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Sorption und Desorption

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe, Abfallmatrix, Geochemisches Milieu im Grubenbau: Durch die Korrosionsprozesse werden das Inventar an sonstigen Stoffen verändert, die Eigenschaften der Abfallmatrix und das geochemische Milieu beeinflusst.

Sorption und Desorption: Infolge der Glaskorrosion entstehen Sekundärphasen (z. B. Tonminerale, schwerlösliche Sulfate, Powellit), die hohe Sorptionskapazitäten für Radionuklide aufweisen.

65.11 Offene Fragen

- Temperaturabhängigkeit der Korrosion von Glas, insbesondere Temperaturabhängigkeit der Langzeit-Korrosionsraten
- Langzeitrates der Glasauflösung (nach Erreichen der Si-Sättigung) und deren Abhängigkeit von der Kopplung zwischen Korrosion und Fällungsreaktionen

65.12 Literaturquellen

Grambow, B. (1997): Vorläufiger Quellterm Glas - Beschreibung der kinetischen Barriere-
wirkung von HAW-Glas im integrierten Nahfeldmodell. Institut für Nukleare Entsor-
gung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, FZK-INE 015/97; Karlsruhe.

Grambow, B. (2006): Nuclear waste glass - how durable? Elements 2: 357-364.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler,
J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergie-
nutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den
Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
mbH; Köln.

Weiterführende Literatur:

Kienzler, B., Altmair, M., Bube, C., Metz, V. (2012): Radionuclide Source Term for
HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Was-
te), Als Bericht KIT-INE 003/11 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanaly-
se Gorleben, KIT-SR 7624, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare
Entsorgung (KIT-INE); Karlsruhe

Loida, A., Luckscheiter, B., Kienzler, B. (1999b): Erstellung eines integrierten Nahfeld-
modells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: geochemisch fun-
dierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement. - FZK-INE
012/99; Karlsruhe.

66 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen (2.1.09.06)

66.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die chemische Zersetzung von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen wird durch Lösungen als Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen bezeichnet.

66.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Baustoffe, die auf Grundlage von (Portland-)Zement hergestellt wurden, werden im FEP-Katalog als Materialien mit Zementphasen betrachtet. Materialien mit Sorelphasen werden auf Grundlage von $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{-MgCl}_2$ bzw. auf Grundlage von $\text{MgO-H}_2\text{O-MgCl}_2$ hergestellt.

Vorwiegend werden diese Materialien mit Zuschlägen als Beton verwendet. Betone mit Sorelphasen werden aufgrund der abdichtenden Eigenschaften bevorzugt in Dichtbauwerken eingesetzt; Beton mit Portland-Zement und Salzgrus wird in Strukturelementen im Grubenbau, z. B. Fahrbahnbeläge, verwendet; für Abschirmbehälter und -deckel wird Beton und Schwerbeton aus Portlandzement und silikatischen/Fe-oxidreichen Zuschlägen verwendet; zur Kontrolle der Herstellung von zementierten Abfallprodukten werden Portlandzemente mit gewissen Zuschlagstoffen (z. B. Kiessand, Hämatit) je nach gewünschter Dichte eingesetzt.

Unter der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen werden eine Reihe von chemischen Wechselwirkungen mit anstehenden Lösungen und deren Komponenten zusammengefasst, die zur Veränderung der mechanischen und chemischen Eigenschaften der Materialien mit Zement- bzw. Sorelphasen führen. Für die Korrosion von Zementphasen sind folgende Reaktionen von wesentlicher Bedeutung:

- Carbonat- und Sulfat-Korrosion
- Ionenaustauschprozesse, insbesondere Calcium-Magnesium Austausch bei Korrosion von Portlandzement-haltigen Materialien in Mg-reichen Salzlösungen

Die Reaktionen des Zement oder Sorelphasen mit den Lösungen verändern die Zusammensetzung, infolgedessen auch das geochemische Milieu und insbesondere den pH-Wert in Abhängigkeit vom Umsatz (z. B. pH plume).

Materialien mit Zement- oder Sorelphasen weisen eine offene Porenstruktur auf. Die Porosität und die Größe der Poren hängen von der Herstellung des Zementes (besonders dem Mengenverhältnis von Anmachwasser zu Zement) ab. Unterschiede in der Korrosionsgeschwindigkeit hängen in der Regel von der Porosität ab. Qualitativ hochwertige zementhaltige Materialien und Betone weisen eine geringe Porosität auf. "Sorelzement"-haltige Materialien (3-1-8 Phase) sind in $MgCl_2$ -reichen Salzlösungen stabil. In gesättigten NaCl-Lösungen kommt es im geringen Umfang zur Reaktion des Sorelzements zu $Mg(OH)_2$, bis sich eine an $MgCl_2$ angereicherte Salzlösung gebildet hat (Oestreich 2009).

Der Korrosionsfortschritt von Materialien mit Zement- und Sorelphasen hängt auch von der Masse des Zements zur Masse der wechselwirkenden Lösung und deren Zusammensetzung ab.

66.3 Sachlage am Standort

Materialien mit Zement- oder Sorelphasen treten im Endlager auf als:

- Abfallmatrix, d. h. zur Verfestigung von schwach- bzw. mittelradioaktiven Stoffen,
- Selbstabschirmende Behältermaterialien,
- Strukturelemente von Barrieren, z. B. Schacht- und Streckenverschlüssen, Verfüllungen von Erkundungsbohrungen (siehe FEP Sonstige Verschlussbauwerke) und
- Strecken-/Fahrbahnausbau (siehe FEP Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften).

Es muss zwischen "Portlandzement"-haltigen und "Sorelzement"-haltigen Materialien unterschieden werden. Beim Abbinden von Portlandzementen reagieren Portland- und Hochofenzemente unter der Bildung von CSH (Calcium-Silikat-Hydrat) Phasen und Portlandit ($Ca(OH)_2$). Sorelzemente entstehen durch die Reaktion von MgO oder $Mg(OH)_2$ mit $MgCl_2$ -haltigen Lösungen. Im Unterschied zu "Portlandzement"-haltigen

Materialien treten Sorelzemente nur als Bestandteile von Verschlussbauwerken und technischen Einrichtungen auf.

Die Korrosionsreaktionen der "Portlandzement"-haltigen Materialien erfolgen in gesättigten NaCl-Lösungen oder in MgCl₂-reichen Lösungen (bspw. Kainit- oder Carnallit-gesättigte Lösungen) unterschiedlich:

In NaCl-Lösung diffundieren Chloridionen in das zementhaltige Material während OH(-)-Ionen aus dem Zement in die anstehende Lösung diffundieren. Die Löslichkeit von Portlandit ist gering, so dass sich nur wenig Portlandit auflöst und die mechanischen Eigenschaften über lange Zeiten erhalten bleiben. Lediglich im Falle eines sehr großen Lösungsvolumens oder Abtransport der Lösung kann langfristig der pH im zementhaltigen Material reduziert werden, die Porosität nimmt zu und die mechanische Stabilität ab. In MgCl₂-reichen Lösungen finden zunächst ebenfalls diffusionskontrollierte Transportprozesse im Porenraum der zementhaltigen Materialien statt. Hierbei erfolgt ein Austausch von Ca mit Mg mit der Folge, dass zunächst das Portlandit und CSH-Phasen in gelartige Mg-reiche Hydroxide und Hydroxochloride überführt werden. Dabei nimmt der pH im Porenraum von ~13 auf ca. 9 ab. Damit einhergehend ist eine Verringerung der mechanischen Stabilität der Zementprodukte. Zusätzlich reagiert das bereits angegriffene Material mit Sulfat in der Lösung und die mechanische Degradation schreitet fort. Eine vollständige Korrosion von zementierten Abfallprodukten, die in unmittelbarem Kontakt mit Salzlösungen (NaCl, MgCl₂) standen, wurde innerhalb von 15 bis 22 Jahren beobachtet (Bube et al. 2011, Kienzler et al. 2010). Abhängig vom Verhältnis der Zementmasse zum Lösungsvolumen ändert sich der pH in der Lösung (geochemisches Milieu). Im Falle von NaCl-Lösungen steigt der pH in wenigen Tagen auf Werte bis 13, bei Zutritt von MgCl₂-Lösung kann der pH zwischen 8 und 12 liegen. Werden hohe pH-Werte erreicht, hat sich die Mg-reiche Lösung in eine Ca-reiche Lösung verändert.

Die Korrosionsrate ist höher im Falle der zementierten Abfallprodukte im Vergleich zu selbstabschirmenden Betonbehältern oder Strukturelementen. "Sorelzement"-haltige Materialien reagieren in geringem Umfang in MgCl₂-NaCl-haltigen Salzlösungen. Ab einer Konzentration von 1 mol MgCl₂/kg H₂O liegt die sogenannte 3-1-8 Sorelphase (Mg₂(OH)₃Cl·4H₂O) bei 25 °C als stabile Phase vor; bei Konzentrationen kleiner 1 molal MgCl₂ bildet sich Brucit (Mg(OH)₂) (Altmaier et al. 2004). Bei 25 °C tritt die sogenannte 5-1-8 Sorelphase (Mg₃(OH)₅Cl·4H₂O) metastabil auf und wandelt sich langfristig in die 3-1-8 Sorelphase. Bei einer Temperatur von 120 °C sind in MgCl₂-NaCl-

Salzlösungen Brucit und die sogenannte 9-1-5 Sorelphase ($\text{Mg}_{10}(\text{OH})_{18}\text{Cl}_2 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$) stabil (Dinnebier et al. 2010, Oestreich 2009).

66.4 Standortspezifische Auswirkungen

Korrodierte "Portlandzement-" oder "Sorelzement"-haltigen Materialien weisen eine hohe Sorptionsfähigkeit für Radionuklide auf (Lützenkirchen et al. 2003, Metz et al. 2004, 2011).

Im Falle der Einlagerung von zementierten Abfallprodukten (Abfallprodukte mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) kann es zur Wechselwirkung CaCl_2 -reicher Lösung (entstanden durch Umsetzung aus MgCl_2 -reicher Lösung) und Verschlussbauwerken aus Sorelzement kommen. Die CaCl_2 -Lösung kann deren Stabilität beeinträchtigen bzw. die Korrosion beeinflussen.

Beim Einsatz von Sorelzementen als Bestandteile von Verschlussbauwerken und technischen Einrichtungen werden in der Regel nicht vollständig abgebundene Zemente verwendet. In Folge der Umwandlung von Ausgangsstoffen ($\text{Mg}(\text{OH})_2$ - MgCl_2 oder MgO - H_2O - MgCl_2) zu Sorelphasen bzw. beim Übergang von metastabilen 5-1-8 Sorelphasen in stabile 3-1-8 Sorelphasen kommt es zu Volumenänderungen.

66.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Eine Korrosion von Zementphasen (Portland-Zement) beginnt sofort mit dem Vorhandensein von Salzlösungen. Sorelzemente sind so ausgelegt, dass sie in den standortspezifischen Salzlösungen stabil sind. Kommen Sorelzemente mit Lösungen in Kontakt, die durch Alteration mit Abfallprodukten sich deutlich von MgCl_2 - NaCl -haltigen Salzlösungen unterscheiden, kommt es zu Phasenumwandlungen.

66.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

66.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

66.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse

66.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Da Materialien mit Zement- oder Sorelphasen als Strukturelemente von Barrieren eingesetzt werden, sowie Zementmaterialien zusätzlich als Abfallmatrix und Behältermaterialien verwendet werden und diese z. T. mit Lösungen in Kontakt kommen werden, ist dieser FEP wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Materialien mit Zement- oder Sorelphasen sind Komponenten des Nahfeldes und werden in den Strecken und Schächten verwendet. Durch Korrosion von Zementphasen kann es zum Nachlösen von NaCl aus dem Wirtsgestein kommen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Verschlussbauwerke werden unter anderem aus Materialien mit Zement- oder Sorelphasen hergestellt. Konsequenzen eines etwaigen Einsatzes von "Portlandzement-" oder "Sorelzement"-haltigen Materialien in Erkundungsbohrungen wird im FEP Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen betrachtet.

66.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Sonstige Endlagerbehälter

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Verschlussmaterial

Sonstige Verschlussbauwerke

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Wärmeproduktion

Radiolyse

Diffusion

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Verfüllungen von Erkundungsbohrungen aus Materialien mit Sorelphasen können durch Lösungszutritt entlang der Wegsamkeiten korrodieren.

Inventar: Sonstige Stoffe: Dieser FEP beschreibt die vorhandenen "Sorelzement"- und/oder "Portlandzement"-haltigen Materialien.

Abfallmatrix: Dieser FEP beschreibt die "Portlandzement"-haltigen Abfallmatrices.

Sonstige Endlagerbehälter: Dieser FEP beschreibt die "Portlandzement"-haltigen Behälter.

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Der Behälterausfall ist die Voraussetzung für eine fortschreitende Korrosion der zementhaltigen Abfallmatrix.

Verschlussmaterial: Dieser FEP beschreibt die "Sorelzement"- und/oder "Portlandzement"-haltigen Verschlussmaterialien.

Sonstige Verschlussbauwerke: z. B. Dichtpropfen mit Sorelphasen.

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften: Können Sorelphasen und Zement enthalten.

Lösungen im Grubenbau: Voraussetzung für Korrosion

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen werden sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst; Korrosionsprozesse sind direkt abhängig von pH-Wert, Konzentrationen an Hauptlösungskomponenten (u. a. Na(+), Mg(2+), Ca(2+)) und vom Sättigungsgrad der Lösung gegenüber Festphasen.

Auflösung und Ausfällung: Wichtiger Teilprozess der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Wärmeproduktion: Kann Einfluss auf Korrosionsprozesse haben.

Radiolyse: Da Wasser eine Komponente des Zements (Abfallmatrix) ist, kann Radiolyse eine Rolle spielen.

Diffusion: Das FEP Diffusion spielt für verschiedene Prozesse und in unterschiedlichen räumlichen Skalen eine Rolle. Die Prozesse/Skalen beinhalten:

- Diffusion von Ionen im Porenraum
- Gleichgewichtseinstellung durch Diffusion (Ausfällung, Auflösung, diffusionskontrolliert oder kinetisch kontrolliert).
- Transportprozesse über größere Strecken führen zur Durchmischung von Lösungen und bestimmen das Ausmaß der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen.

Bemerkungen:

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Indirekt über Lösungszutritt und Lösungen im Grubenbau.

Fluiddruck: Bei den möglichen Druckverhältnissen keine Relevanz auf diesen Prozess.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Sonstige Endlagerbehälter

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters Verschlussmaterial

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Ausfall eines Dichtpfropfens

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Radionuklidmobilisierung

Sorption und Desorption

Kolloide

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Durch die Korrosion von zementhaltigen Materialien in Erkundungsbohrungen (Verfüllung) kann es zu Wegsamkeiten in den Bohrungen kommen.

Inventar: Sonstige Stoffe: Dazu zählen auch Sorelphasen und Zemente, deren Inventare durch Korrosion verändert werden.

Abfallmatrix: wird durch Korrosion verändert, soweit durch Zement gebunden.

Sonstige Endlagerbehälter: bestehen z. T. aus Zementen.

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Kann durch Korrosion von zementhaltigen Materialien ausgelöst werden. Eigenschaften und Zusammensetzung der zementhaltigen Materialien werden durch die Korrosion verändert.

Verschlussmaterial: wird durch Korrosion verändert.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Bestandteile der Verschlussbauwerke mit Zement- oder Sorelphasen werden korrodiert.

Sonstige Verschlussbauwerke: z. B. Dichtpropfen mit Sorelphasen werden verändert.
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Anderes Volumen der Korrosionsprodukte.

Lösungen im Grubenbau: Wasser ist je nach verwendetem Material Edukt oder Produkt bei der Korrosion zementhaltiger Materialien.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Wichtiger Einfluss auf das geochemische Milieu (z. B. Ionenaustausch, pH-Pufferung).

Radionuklidmobilisierung: Vergrößerung der Oberfläche, Freisetzung aus einer bestehenden Bindung.

Sorption und Desorption: Korrosionsprodukte haben veränderte Sorptionseigenschaften im Vergleich zu den Ausgangsstoffen (z. B. Sorptionseigenschaften von Zementkorrosionsprodukte im Vergleich zu Sorptionseigenschaften von Zementstein).

Kolloide: Sorelphasen-Kolloide sind nur dann stabil, wenn gleichzeitig auch feste Sorelphasen vorhanden sind. Im Falle einer Verdünnung einer konzentrierten $MgCl_2$ -Lösung oder in einer $NaCl$ -Lösung ist weder feste noch kolloidale Sorelphase stabil.

Bemerkungen:

Komplexbildung, Zersetzung von Organika, Quellen des Bentonits, Auflösung und Ausfällung Korrosionsprozesse (Metallkorrosion, Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas, Korrosion von graphithaltigen Abfällen und Urantails) wirken indirekt.

66.11 Offene Fragen

Einfluss der Temperatur auf die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, insbesondere der Einfluss einer Temperaturerhöhung im Einlagerungsbereich mit zementhaltigen Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die durch den Wärmeeintrag aus dem Einlagerungsfeld für hochaktive Abfälle entsteht.

66.12 Literaturquellen

Bube, C., Metz, V., Schild, D., Lagos, M., Bohnert, E., Garbev, K., Altmaier, M., Kienzler, B. (2011): Interactions of U(VI) with cement alteration products in highly saline solutions. 1st International Symposium on Cement-based Materials for Nuclear Waste, NUWCEM 2 011; Avignon, France.

Dinnebier, R.E., Freyer, D., Bettle, S., Oestreich, M. (2010): $9\text{Mg}(\text{OH})_2:\text{MgCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, a high temperature phase of the magnesia binder system. *Inorganic Chemistry* 49: 9770-9776.

Kienzler, B., Metz, V., Brendebach, B., Finck, N., Plaschke, M., Rabung, Th., Rothe, J., Schild, D. (2010): Chemical status of U(VI) in cemented waste forms under saline conditions. *Radiochimica Acta* 98: 675-684.

Lützenkirchen, J., Vejmělka, P., Metz, V., Kienzler, B. (2003): Site specific sorption data for the Asse salt mine. The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation ICEM'03; Oxford, England, Sep 21-25.

Metz, V., Lützenkirchen, J., Vejmělka P., Kienzler, B. (2004): Np sorption onto cement and $\text{Mg}(\text{OH})_4$ -based backfill material in altered Q-brine. Conference Proceedings SOPRO-conference Karlsruhe, Mar 25-26, FZKA 6986; Karlsruhe.

Metz, V., Bohnert, E., Kienzler, B., Garbev, K., Bauer, A., Bender, K., Bube, C., Hilpp, S., Mioisei-Rabung, S., Lützenkirchen, J., Plaschke, M., Schlieker, M., Schild, D., Soballa, E., Walschburger, C. (2011): Studie zur Abschätzung der standortspezifischen Pu- und Am-Rückhaltung (Schachtanlage Asse II) - Abschlussbericht BfS Projekt Experimentelle Überprüfung der Abschätzung kammer-spezifischer Pu- und Am-Konzentrationen für die Schachtanlage Asse II, Institut für Nukleare Entsorgung, Karlsruhe Institut für Technologie.

Oestreich, M. (2009): Untersuchungen zur Phasenbildung in basischen MgCl_2 -Lösungen. Diplomarbeit Technische Universität Bergakademie Freiberg.

67 Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme (2.1.09.07)

67.1 Definition/Kurzbeschreibung

Durch das Eindringen von Wasserstoff in das Gefüge bestimmter Materialien (Metalle) wird eine Änderung ihrer mechanischen Eigenschaften verursacht.

67.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das Phänomen spielt vor allem bei der Beurteilung der Festigkeitseigenschaften von Metallen bzw. Legierungen eine Rolle. Stähle sind besonders von Wasserstoffversprödung betroffen. In chemischen Prozessen (z. B. Metallkorrosion) gebildeter atomarer Wasserstoff dringt in das Gefüge von metallischen Werkstoffen ein, wo er sich an Gitterstörstellen wieder zu molekularem Wasserstoff verbindet und dort verbleibt. Dabei kann der Wasserstoff schon während des Herstellungsprozesses aufgenommen werden oder aber auch später von außen in die Metallstruktur eindringen.

Durch die Einlagerung des Wasserstoffs in das Metallgitter wird dieses geweitet. Das führt zu inneren Spannungen und zu einer Versprödung des Metalls. Auch wenn der Wasserstoff wieder aus dem Metall ausgetreten ist, ist der Fehler im Gitter vorhanden und sorgt so für eine dauerhafte Schwächung der Struktur. Eine detailliertere Beschreibung der ablaufenden Prozesse findet sich z. B. bei Kaesche (1990) oder bei Louthan et al. (1972).

67.3 Sachlage am Standort

Die Versprödung metallischer Werkstoffe ist nur für die in den Endlagerbehältern verwendeten Materialien von Bedeutung. Die Versprödung anderer metallischer Komponenten (z. B. Anker) haben keine Relevanz für die Sicherheit des Endlagers.

Die folgenden metallischen Werkstoffe werden zur Herstellung der Behälter und Deckel verwendet (siehe auch FEP Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Bohrlochverrohrung sowie die Beschreibung der Endlagerkonzepte (Bollingerfehr et al. 2011, Bollingerfehr et al. 2012):

1. Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff EN-GJS-400-15U (alte Bezeichnung GGG40, Werkstoffnummer 0.7040)) findet Verwendung zur Herstellung der Außenbehälter der POLLUX-9- und POLLUX-10-Behälter und bei der Bohrlochlage- rung (Variante C) für die Bohrlochverrohrung. Mit Ausnahmen der CASTOR- Behälter vom Typ TS 28 V und TN 85 (siehe unter 5.) bestehen die Grundkörper der verwendeten CASTOR-Behältertypen (THTR/AVR, KNK, MTR 2, HAW 20/28 CG und HAW 28 M) ebenfalls aus diesem Werkstoff. Bei einigen CASTOR- Behältertypen sind auch Primär- und/oder Sekundärdeckel aus Gusseisen. Bei den MOSAIK-Behältern (= Konrad-Gussbehälter TYP II), die für die Einlagerung von Graphit bzw. graphithaltigen Abfällen, Brennelement-Strukturteilen sowie Mischab- fälle vorgesehen sind, handelt sich um dickwandige, zylindrische Gussbehälter aus GGG40 mit eingesetzten oder aufliegenden Deckeln aus demselben Material.
2. Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210) wird zur Herstellung der Innenbe- hälter der POLLUX-9- und POLLUX-10-Behälter eingesetzt. Die Behälter der Brennstabkokillen sowie die vorgesehenen Triplepacks für die Kokillen bestehen ebenfalls aus diesem Werkstoff. Beim CASTOR MTR 2 sind am oberen Zylinder- ende Primär- und Sekundärdeckel aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.0566) ange- ordnet.
3. Die Innenbüchsen der Brennstabkokillen und POLLUX-Behälter bestehen aus ei- nem austenitischen Edelstahl (CrNiTi-legiert, Werkstoff 1.4541). Die als Primärbe- hälter für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung verwendeten CSD-Kokillen wer- den ebenfalls aus einem austenitischen Edelstahl (Werkstoff 1.4833) gefertigt. Zu- dem sind beim CASTOR MTR 2 die Primär- und Sekundärdeckel z. T. aus einem austenitischen Edelstahl (Werkstoff 1.4313) hergestellt.
4. Unlegierte Baustähle (verschiedene Werkstoffe) werden bei einigen CASTOR- Behälter-Typen für die Primär- und/oder Sekundärdeckel eingesetzt.
5. Schmiedestähle werden bei einigen CASTOR-Behälter-Typen für die Primär- und/oder Sekundärdeckel eingesetzt. Der CASTOR TS 28 V besteht aus einem Grundkörper aus Schmiedestahl mit einem Außenmantel aus Stahl, der durch Kup- ferstege am Grundkörper befestigt ist. Der TN 85 besteht ebenfalls aus Schmiede- stahl.
6. Für die Einlagerung der Mischabfälle und Urantails sind Konrad-Container der Ty- pen IV bzw. VI vorgesehen. Es handelt es sich um quaderförmige Behälter, die aus

Stahlblech (z. B. St 37.2) hergestellt werden. Die Container-Deckel werden jeweils aus demselben Material hergestellt wie der Behälterkörper.

7. Ebenfalls von Wasserstoffversprödung können Titanlegierungen (TiPd Behälterbeschichtungen) und das Zircaloy der Hüllrohre der abgebrannten Kernbrennstoffe (in BSK, CASTOR und POLLUX sowie kompaktiert in den CSD-C Gebinden) betroffen sein.

Der Einfluss der Wasserstoffaufnahme auf das mechanische Verhalten von Metallen ist ein gut untersuchtes Phänomen, z. B. Barthelmy (2011). Die Untersuchungen beziehen sich aber hauptsächlich auf Bedingungen, die beim Bau von Pipelines oder im Fahrzeugbau herrschen. Der Einfluss von Wasserstoff auf die Integrität der metallischen Behältermaterialien unter Endlagerbedingungen im Salz wurde bisher nicht untersucht. Farmer et al. (1991) führen die Materialversprödung durch Wasserstoff als einen der Prozesse auf, die bei der Beurteilung der Funktionsdauer von Endlagerbehältern zu berücksichtigen sind. Für unlegierte Stähle und Gusseisen wurden Untersuchungen für Endlagerbedingungen in Granit durchgeführt (Heitz & Zur Megede 1982).

Die Metallkorrosion stellt einen Prozess dar, bei dem Wasserstoff entsteht, der sich in die Struktur der Metalle einlagern kann. Eine Versprödung der Behältermaterialien durch Wasserstoff ist daher zu betrachten. Die austenitischen Edelstähle sind dabei weniger anfällig für eine Wasserstoffversprödung als die anderen verwendeten Behältermaterialien.

67.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Eine Versprödung der Behältermaterialien durch Wasserstoffaufnahme verändert die Festigkeit des Metalls und kann somit dazu beitragen, dass Behälter bzw. die Bohrlochverrohrungen ausfallen. Ob die in einem Endlager am Standort Gorleben auftretenden Spannungen ausreichen, um zu einem Ausfall dieser Komponenten zu führen, wurde bisher nicht untersucht. Für die Brennelement-Behälter muss durch die Auslegung sichergestellt werden, dass der in den Sicherheitsanforderungen geforderte Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sind.

Bei den metallischen Komponenten der Abfallmatrices (Hüllrohre, CSD-C) kann die Versprödung der Materialien Einfluss auf die Mobilisierung von Radionukliden aus diesen Abfällen haben (Chan 1996).

67.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

67.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

67.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

67.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Brennelement-Behälter

67.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Bei der Korrosion der Behälter wird Wasserstoff produziert, der zu einer Versprödung der metallischen Behälterkomponenten führen kann.

Wirkung in den Teilsystemen: Im Nahfeld ist der Einfluss des Wasserstoffes auf die Behältermaterialien zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung auf Initial-Barrieren: Da die Brennelement-Behälter zu den Initial-Barrieren zählen, hat die Materialversprödung einen direkten Einfluss auf Initial-Barrieren.

67.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Bohrlochverrohrung

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Gasmenge im Grubenbau

Begründungen:

Inventar: Metalle: Die über die Behältermaterialien hinaus in den Grubenbaue vorhandenen Metalle können verspröden und so Wasserstoff aufnehmen.

Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Bohrlochverrohrung: Die verwendeten Behältermaterialien bestimmen das Ausmaß einer Wasserstoffversprödung, so sind z. B. austenitische CrNi-Stähle anfällig als Feinkornbaustähle.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Einlagerung von Wasserstoff in Metallen ist abhängig vom herrschenden geochemischen Milieu.

Gasmenge im Grubenbau: Die Menge und der Partialdruck des vorhandenen Wasserstoffes sind eine entscheidende Voraussetzung für eine Materialversprödung durch H₂.

Bemerkungen:

Metallkorrosion, Gasbildung: Der Einfluss der durch die Metallkorrosion gebildeten Menge an Wasserstoff wird mit dem FEP Gasmenge im Grubenbau beschrieben.

Fluiddruck: Die Einlagerung von Wasserstoff in Metallen ist abhängig vom Wasserstoffpartialdruck. Dieser wird nicht mit dem Fluiddruck beschrieben.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Metalle

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versagen eines Brennelement-Behälters

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Inventar: Metalle, Behälter-FEP und deren möglicher Ausfall, Bohrlochverrohrung und deren möglicher Ausfall: Eine Versprödung durch Wasserstoffstoff ändert die Eigenschaften der Behältermaterialien, kann ggf. den Ausfall eines Behälters beeinflussen.

Radionuklidmobilisierung: Eine Versprödung von Zirkalloy kann ggf. die Mobilisierung aus den Hüllrohren der Brennelemente beeinflussen.

Bemerkungen:

Behälterausfall: Die geänderten Eigenschaften der Behälter können in einem Ausfall der Behälter resultieren.

Metallkorrosion: Die geänderten Eigenschaften der Behälter können auch den Ablauf der Korrosion der Metalle beeinflussen.

67.11 Offene Fragen

- Es wurde bisher nicht untersucht, ob die im Endlager auftretenden Lastspannungen hinreichen, um zum Behälterausfall durch Materialversprödung zu führen.
- Änderung der mechanischen Stabilität (Festigkeit) durch Materialversprödung

67.12 Literaturquellen

Barthelmy, H. (2011): Effects of pressure and purity on the hydrogen embrittlement of steels. - International Journal of Hydrogen Energy 36: 2750-2758.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Chan, K.S. (1996): A micromechanical model for predicting hydride embrittlement in nuclear fuel cladding material. - Journal of Nuclear Materials 227: 220-236.

Farmer, J.C., Gdowski, G.E., McRight, R.D., Ahluwalia, H.S. (1991): Corrosion models for performance assessment radioactive-waste containers. - Nuclear Engineering and Design 129: 57-88.

Heitz, E., Zur Megede, D. (1982): Korrosionsverhalten von unlegiertem Stahl, Stahlguss und Gusseisen als Endlagerbehälterwerkstoff in wasserführendem Granitgestein. - Nagra NTB 82-08; Wetingen, Schweiz.

Kaesche, H. (1990): Die Korrosion der Metalle: Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme. - 3. Auflage, Springer-Verlag; Berlin.

Louthan, M.R., Caskey, G.R., Donovan, J.A., Rawl, D.E. (1972): - Hydrogen Embrittlement of Metals. Materials Science and Engineering 10: 357-368.

Weiterführende Literatur:

Berns, H., Theisen, W. : Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen, Springer-Verlag; Heidelberg, Berlin.

Hirth, J.P. (1980): Effects of Hydrogen on the Properties of Iron and Steel. - Metallurgical Transactions A, Vol. 11, No.6: 861-890.

Kolman, D.G. (2001): A review of the potential environmentally assisted failure mechanisms of austenitic stainless steel storage containers housing stabilized radioactive compounds. - Corrosion Science 43: 99-125.

68 Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails (2.1.09.08)

68.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails beschreibt die chemischen Wechselwirkungen dieser Stoffe mit wässrigen Lösungen. Graphithaltige Stoffe sind sowohl Bestandteil der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung als auch Bestandteil der Brennelemente aus dem AVR bzw. THTR.

68.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Radionuklidmobilisierung aus graphithaltigen Materialien und Urantails sind chemisch sehr unterschiedliche Prozesse. Die Radionuklidmobilisierung kann erst dann beginnen, wenn Lösungen an die Abfälle gelangen.

Das Verhalten von graphithaltigen Materialien beschreibt die Reaktionen der graphithaltigen Matrices der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, aus graphitummantelten Brennelemente aus dem AVR bzw. THTR sowie Moderator/Reflektormaterial aus Forschungsreaktoren und als Moderator-Material in Abfallbehältern. Tails aus der Uran-Anreicherung enthalten U_3O_8 und Uranfluoride. Das Verhalten von Urantails wird durch die Anwesenheit von leichtlöslichen Fluoridphasen bestimmt.

68.3 Sachlage am Standort

Urantails: Im Endlagerkonzept für den Standort Gorleben ist die Einlagerung von rd. 110.000 Mg Urantails mit rd. 2.200 Mg Uranylfluorid berücksichtigt. Fluoride sind die Salze der Fluorwasserstoffsäure (HF, Flusssäure). Diese Säure und deren Salze sind nicht mit den geplanten Verpackungskonzepten kompatibel. Aufgrund seiner hohen Löslichkeitsgrenze ist Uranhexafluorid vollständig auflösbar. Im sauren pH-Bereich und redoxneutralen bis oxidierenden Bedingungen wird die Uran-Speziation durch $UO_2(2+)$ dominiert, und es besteht keine effektive Löslichkeitsbegrenzung für $UO_2(2+)$ unter diesen Bedingungen.

Graphit: Graphit stellt eine geochemisch stabile Phase dar. Allerdings bestehen die graphithaltigen Materialien nur zum geringen Teil aus reinem Graphit sondern auch aus „Kohlestein“, das aus Kohle gewonnen wurde und noch das gesamte Spektrum der Elemente der natürlichen Steinkohle enthält. Daher ist Uran vorhanden, das durch n-Einfang zu Plutonium umgewandelt wurde. Kohlestein enthält auch Sinterhilfsmittel mit hohem Stickstoffgehalt, der durch Aktivierung zu C-14 umgewandelt wurde.

Im Abfallinventar sind graphithaltige Stoffe auch als AVR/THTR-BE (173 Mg), als Moderator/Reflektormaterial aus Forschungsreaktoren (2.200 Mg) sowie als Moderator-Material in POLLUX-Behältern (658 Mg) sowie (optional) in BSK/Triple-Packs (912 Mg) vorhanden.

Korrosion von nuklearem Graphit in chloridreichen Lösungen wurde u. a. von Podrzhina (2004) untersucht. In dieser Arbeit wurden Graphit-Korrosionsexperimente in $MgCl_2$ -reicher, sowie $NaCl$ -reicher Lösung und destilliertem Wasser durchgeführt. Es zeigt sich, dass die durchschnittlichen Korrosionsraten unter oxidierenden Bedingungen in Lösungen höherer Ionenstärken niedriger sind als in destilliertem Wasser. Dieser Trend wurde auch bei Auslaugexperimenten an Graphit aus dem amerikanischen Hanford-Reaktor beobachtet (PNL 6769, 1988). Die Korrosion wurde dabei nicht durch eine Reaktion von Graphit-Kohlenstoff mit Wasser bestimmt, sondern durch Oxidation von Kohlenstoff zu CO_2 mittels gelösten Sauerstoffs. In Experimenten mit gamma-Strahlung waren die Korrosionsraten in konzentrierten $MgCl_2$ - und $NaCl$ -Lösungen höher als in reinem Wasser. Hier wurde die Reaktion von oxidierenden Radiolyseprodukten dominiert (Podrzhina 2004). Unter reduzierenden Bedingungen, wie sie im Endlager langfristig erwartet werden, kann daher von sehr niedrigen Korrosionsraten ausgegangen werden.

68.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch Wechselwirkungen mit den Urantails (bzw. deren HF-haltigen Abfallkomponenten) kann es zu einer Versauerung zutretender Lösungen kommen.

Solange der Luftsauerstoff im Grubenbau noch nicht (z. B. durch Metallkorrosionsprozesse) verbraucht ist, können infolge von Graphitkorrosion anorganische Kohlenstoffspezies wie CO_3^{2-} oder $CO_2(g)$ gebildet werden, die zu einer Carbonatkomplexierung von Radionukliden führen können. C-14 kann als $CO_2(g)$ freigesetzt werden.

Zu beachten ist, dass Graphit eine höhere Elektronegativität als Edelstahl besitzt, wodurch direkter Kontakt zwischen den beiden Materialien zu frühzeitigem Integritätsverlust bzw. einem Behälterausfall durch Korrosion führen kann. Experimentelle Studien zeigten (IAEA TECDOC 1521, 2006), dass Behälterkorrosionsraten um bis zu einem Faktor 10 erhöht werden können.

68.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

68.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

68.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

68.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

68.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Unter der Voraussetzung, dass Lösung zu den Abfällen gelangt, ist dieser Prozess wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Per Definition nur im Nahfeld zu betrachten.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Die graphithaltigen Matrices und U_3O_8 , wie auch die anderen Abfallmatrices und Abfallbehälter mit Ausnahme der Brennelement-Behälter gehören nicht zu den Initial-Barrieren.

68.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Versagen eines Brennelement-Behälters

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Wärmeproduktion

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe: Stellt die Menge an vorhandenem Graphit und Urantails im Endlager dar.

Abfallmatrix: auch Graphit und Uranoxid stellt eine Abfallmatrix dar.

Versagen eines Brennelement-Behälters: betrifft Behälter für Forschungsbrennelemente. Infolge eines Behälterversagens können größere Mengen an Lösungen an graphithaltigen Moderatoren der Forschungsbrennelemente gelangen.

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Erst nach einem Behälterausfall können größere Mengen an Lösungen an graphithaltigen Materialien und Urantails gelangen.

Lösungen im Grubenbau: Sind eine wichtige Voraussetzung für Reaktionen mit graphithaltigen Materialien und Urantails.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Das Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails wird sowohl in der Reaktionskinetik als auch im Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst.

Auflösung und Ausfällung: Wichtige Prozesse bei Reaktionen mit graphithaltigen Materialien und Urantails.

Wärmeproduktion: Wärmeproduktion beeinflusst u. a. die Kinetik von Reaktionen mit graphithaltigen Materialien und Urantails.

Resultierende FEP: keine

Bemerkungen:

Radionuklidmobilisierung: Die Mobilisierung von Radionukliden (z. B. C-14) erfolgt nicht zwangsläufig bei Wechselwirkungen mit graphithaltigen Materialien, da auch inaktive graphithaltige Materialien eingelagert werden.

Gasbildung: Bei der Korrosion von graphithaltigen Matrices und U_3O_8 entstehen keine Gase.

Beeinflusste FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Radionuklidmobilisierung

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe: Betrifft Graphit, Kohlestein und Uranverbindungen.

Abfallmatrix: Die chemischen Wechselwirkungen von graphithaltigen Materialien und Urantails verändern die Konsistenz der Abfallmatrix und somit deren Rückhalteeigenschaften.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Reaktionen mit graphithaltigen Materialien und Urantails beeinflussen das geochemische Milieu u. a. durch Änderung des Lösungs-pH.

Radionuklidmobilisierung: Bei der Korrosion werden Radionuklide freigesetzt, können aber auch in Sekundärphasen zurückgehalten werden.

68.11 Offene Fragen

Die Korrosion von graphithaltigen Materialien und Urantails ist unter den zu erwartenden Bedingungen eines Endlagers nicht bzw. unzureichend untersucht und daher sind Aussagen zu diesen Prozessen mit hohen Ungewissheiten behaftet.

68.12 Literaturquellen

Gray, W.J., Morgan, W.C. (1988): Leaching of ¹⁴C and ³⁶C1 from Hanford Reactor Graphite. Pacific Northwest Laboratory Report PNL-6769; Richland, Washington, 43p.

IAEA (2006): Characterization, Treatment and Conditioning of Radioactive Graphite from Decommissioning of Nuclear Reactors. Tecdoc 1521 (IAEA); Vienna, Austria, 71p.

Podrzhina, T. (2004): Graphite as radioactive waste: corrosion behaviour under final repository conditions and thermal treatments. PhD thesis, RWTH Aachen, 115 p.

Weiterführende Literatur:

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

69 Zersetzung von Organika (2.1.10.01)

69.1 Definition/Kurzbeschreibung

In diesem FEP werden alle Prozesse zusammengefasst, die zu einer Zersetzung von Organika führen. Dazu gehören die thermische Zersetzung von organischem Material sowie der Abbau durch mikrobielle Aktivitäten.

69.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In der Regel wird die Zersetzung von Organika durch mikrobielle Aktivitäten gesteuert. Die mikrobielle Zersetzung hängt vom Wasserdargebot, dem geochemischen Milieu (pH-Wert, Redoxpotenzial, Salzgehalt) und der Verfügbarkeit anderer Stoffe wie z. B. Nitrat oder Sulfat ab (siehe FEP Mikrobielle Prozesse im Grubenbau und im Salzstock).

Synthetische Polymere (Kunststoffe) sind für Mikroorganismen wesentlich schwerer abbaubar, einige Kunststoffe haben sich in dem bisherigen möglichen Erfahrungszeitraum als biologisch inert gezeigt. Es ist aber davon auszugehen, dass über die bei der Beschreibung der Endlagerentwicklung zu betrachtenden langen Zeiträume auch die meisten Kunststoffe mikrobiell zersetzt werden. Bei der Beurteilung der Zersetzungsgeschwindigkeit von Kunststoffen ist unter Endlagerbedingungen die thermische Stabilität der Kunststoffe zu berücksichtigen.

Die Zersetzung von Organika geht mit der Bildung von Gasen einher. Kohlendioxid wird bei allen Zersetzungsprozessen von Organika gebildet. Unter den sich in einem Endlager nach kurzer Zeit einstellenden anaeroben Bedingungen wird in der Regel auch Methan gebildet. Detaillierte Beschreibungen der Prozesse unter Endlagerbedingungen finden sich z. B. in Suter et al. (1999).

Die Zersetzung von Stoffen durch ionisierende Strahlung wird im FEP Radiolyse berücksichtigt.

69.3 Sachlage am Standort

Generell wird im Einlagerungsbereich der hochradioaktiven Abfälle und in den technischen Barrieren die Verwendung organischer Stoffe weitgehend vermieden. Bitumen oder Asphalt werden nicht als Baustoff in Verschlussbauwerken eingesetzt. Ausnahmen sind:

- Isolierungen von elektrischen Leitungen und Plastikrohre in Kabeldurchführungen oder organische Bestandteile von Gebirgsankern. Solche Plastikteile sind Gegenstand von langzeitsicherheitlichen Betrachtungen, soweit sie nicht vor dem endgültigen Verschließen des betreffenden Grubenteils wieder ausgebaut werden.
- Zur Abschirmung werden bei POLLUX- und CASTOR-Behältern im Behälterkörper Polyethylenstäben in Bohrungen sowie im Deckel- und Bodenbereich Polyethylenplatten angeordnet. Die BSK enthält im Deckelbereich ebenfalls eine entsprechende Abschirmplatte. Bei den französischen Behältern (TN 85 und TS28V) wird zur Abschirmung u. a. Harz verwendet.

Zusätzliche Mengen an Organika ergeben sich durch die Einlagerung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel des Endlagers. Hier ist ein weites Spektrum an organischen Materialien enthalten, z. B. diverse Kunststoffe und Zellulose.

Eine genaue Zusammensetzung der im Endlager eingelagerten Organika ist im FEP Inventar: Organika gegeben. Neben den eingebrachten Organika kommen im Wirtsgestein in begrenzten Bereichen Kohlenwasserstoffe vor (siehe FEP Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein). Mögliche Zersetzungsprozesse von KW werden in Weber et al. (2011) beschrieben.

Es ist davon auszugehen, dass sowohl die Organika im Laufe der Endlagerentwicklung zersetzt (thermisch und /oder mikrobiell) werden.

69.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Bei der Zersetzung von Organika werden die Verbindungen mit langkettigen Kohlenstoffgerüsten in kurzkettige organische Verbindungen oder sogar in anorganische Kohlenstoffverbindungen umgewandelt. Dabei entstehen Gase oder lösliche Kohlenstoffverbindungen, die zum Teil als Komplexmierungsmittel zum Transport von Radionukliden

beitragen können. Die wichtigsten Zersetzungsprodukte natürlicher Organika und der meisten Kunststoffe sind Methan, Kohlendioxid und Wasserstoff (Parkes et al. 2011).

Der Zersetzungsprozess eines Kunststoffes ist von der Zusammensetzung des Polymer abhängig. Je nach Polymer ergeben sich verschiedene Zersetzungsprodukte. Es bilden sich kurzkettige organische Verbindungen (z. B. Olefine, Paraffine und cyclische Kohlenwasserstoffe), aber auch Chlorwasserstoff, Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.

Die Zersetzung von Organika hat sowohl Einfluss auf die Gasmenge im Endlagersystem als auch auf das geochemische Milieu (Schulze 2002, Rübél & Mönig 2008). Auf Grund des höheren Anteils an Organika ist im Westflügel des Endlagers mit den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen von einer stärkeren mikrobiellen Aktivität und damit einer höheren Gasbildungsrate auszugehen als im Ostflügel mit den wärmeentwickelnden Abfällen. Es ist zu erwarten, dass hier die thermische Zersetzung des Polyethylens im Wärmefeld der Abfälle eine größere Rolle spielt. Die Auswirkungen der thermochemischen Sulfatreduktion sind im FEP Thermochemische Sulfatreduktion beschrieben.

Durch die Mobilisierung von Komplexbildungsmitteln wird auch der Transport von Radionukliden beeinflusst. Werden die bitumenhaltigen Fixierungsmittel bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen zersetzt, kommt es zu einer Mobilisierung von Radionukliden.

69.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

69.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

69.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

69.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

69.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Da Organika in allen Teilsystemen zumindest in geringen Mengen zu erwarten sind, wird eine Zersetzung der Organika in allen Teilsystemen ablaufen.

Wirkung in den Teilsystemen: Im Deck- und Nebengebirge sind nur mikrobielle Prozesse relevant (siehe FEP Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge), daher wird dieses Teilsystem in diesem FEP nicht berücksichtigt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Auswirkungen einer Zersetzung von Organika auf die Initial-Barrieren erfolgt über mehrere weitere FEP (Gasbildung, Gasmenge im Grubenbau und Fluidruck). Die Zersetzung des Polyethylens im Behälterinnern beeinträchtigt nicht direkt die Funktion der Brennelement-Behälter.

69.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Organika

Abfallmatrix

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Wärmeproduktion

Radiolyse

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Inventar: Organika, KW-Vorkommen im Wirtsgestein: Das Inventar an Organika bestimmt das Ausmaß der Zersetzungsprozesse.

Lösungen im Grubenbau: Das Wasserdargebot ist eine wichtige Voraussetzung für organische Zersetzungsprozesse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Zersetzung von Organika ist abhängig vom herrschenden geochemischen Milieu.

Mikrobielle Prozesse im Grubenbau: Können zu einem Abbau von Organika führen.

Wärmeproduktion: Die Zersetzung von Organika ist abhängig von den herrschenden Temperaturverhältnissen.

Radiolyse: Radiolyse kann zur Zersetzung von Organika, z. B. KW, führen.

Thermochemische Sulfatreduktion: Ist ein speziell ausgewiesener Zersetzungsprozess von organischem Material.

Bemerkungen:

Fluiddruck: Die Abhängigkeit der Zersetzung von Organika von den Druckverhältnissen unter Endlagerbedingungen ist vernachlässigbar.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: In den Fluidvorkommen im Wirtsgestein läuft keine Zersetzungsprozesse mehr ab.

Abfallmatrix: Die organischen Bestandteile der Abfallmatrix werden mit dem FEP Inventar: Organika behandelt.

Resultierende FEP:

Gasbildung

Begründungen:

Gasbildung: Eine Zersetzung von Organika ist immer mit der Bildung von Gasen verbunden.

Beeinflusste FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Inventar: Organika

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Radionuklidmobilisierung

Kolloide

Komplexbildung

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Organische Bestandteile von Verrohrungen können zersetzt werden und ggf. Wegsamkeiten bilden.

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein, Inventar: Organika: Ein Abbau von Organika reduziert das Inventar an Organika.

Radionuklidmobilisierung, Abfallmatrix: Organische Bestandteile (Bitumen bei nicht wärmeentwickelnden Abfällen) werden zersetzt und ggf. Radionuklide mobilisiert.

Technische Einrichtungen: Zersetzung z. B. von Kunststoffummantelungen von Ankern.

Behälter: Organische Bestandteile von Behältern (vor allem Pollux) können zersetzt und damit die Eigenschaften der Behälter verändert werden.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Zersetzung von Organika ändert das geochemische Milieu.

Lösungen im Grubenbau: Zersetzungsprozesse können die Lösungsmenge in einem Grubenbau reduzieren.

Kolloide: Kolloide könne bei Zersetzungsprozessen gebildet werden.

Komplexbildung: Komplexe können z. B. bei der Degradation von Zellulose (z. B. ISA) entstehen.

Bemerkungen:

Komplexbildung: Indirekt über das geochemische Milieu.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses: Es sind keine organischen Bestandteile in den Verschlussbauwerken vorgesehen.

69.11 Offene Fragen

Zersetzung und Gasbildung aus Organika im salinaren Milieu mit besonderem Schwerpunkt auf den schwer abbaubaren Kunststoffen (PVC).

69.12 Literaturquellen

Parkes, R.J., Linnane, CD., Webster, G., Sass, H., Weightman, A.J., Hornibrook, E.R., Horsfield, B. (2011): Prokaryotes stimulate mineral H₂ formation for the deep biosphere and subsequent thermogenic activity. - Geology 39: 219-222.

Rübel A., Mönig, J. (Bearbeiter) (2008): Gase in Endlagern im Salz. Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

Schulze, O. (2002): Auswirkung der Gasentwicklung auf die Integrität geringdurchlässiger Barrieregesteine. - BGR; Hannover.

Suter, D., Blaser, P., Brandl, H., Fritz, M. (1999): Gasentwicklung im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) durch mikrobielle Aktivitäten und radiolytische Prozesse. - Colenco-Bericht 4149/28, Colenco Power Engineering AG; Baden, Schweiz.

Weber, J. R., Hammer, J., Schulze, O. (2011): Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. - BGR-Bericht; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Askarieh, M.M., Chambers, A.V., Daniel, F.B.D, Fitzgerald, P.L., Holtom, G.J., Pilkington, N.J., Rees, J.H. (2000): The chemical and microbial degradation of cellulose in the near field of a repository for radioactive wastes. - Waste Management 20: 93-106.

Domininghaus, H. (2005): Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften (VDI-Buch). - Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg.

Schlegel, H.G. (1985): Allgemeine Mikrobiologie. - G. Thieme Verlag; Stuttgart.

70 Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock (2.1.10.02)

70.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses FEP umfasst die Gesamtheit der durch Mikroorganismen verursachten Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock.

70.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Es gibt sehr viele unterschiedliche Arten von Mikroorganismen, die an die unterschiedlichsten Lebensbedingungen adaptiert sind (Spark et al. 2000, Oren 2011), z. B.:

- thermophile Mikroorganismen, die bei etwa 60 °C gedeihen,
- hyperthermophile Mikroorganismen, deren Wachstum bei etwa 90 °C begünstigt wird und
- halophile Mikroorganismen, die in Lösungen mit Salzgehalten von bis zu etwa 350 g/l leben.

Während eine Vielzahl von Mikroorganismen bekannt sind, die in gesättigten NaCl-Lösungen leben, wurden in Lösungen mit hohen MgCl₂-gehalten (> 2,3 M) keine Mikroorganismen mehr gefunden (Hallsworth et al. 2007).

Mikrobielle Prozesse können zur Zersetzung von Organika und zur Veränderung von Mineralphasen führen. Die Auswirkungen der Zersetzung organischer Materialien werden in einem separaten FEP behandelt (Zersetzung von Organika)

Viele Redoxprozesse werden durch Mikroorganismen katalysiert, die die dabei freiwerdende Energie nutzen. Welche Gruppen von Mikroorganismen sich in einem Endlager etablieren und welche Auswirkungen die mikrobiellen Aktivitäten haben hängt sowohl von der Zusammensetzung der eingelagerten Abfälle als auch von den jeweiligen chemischen und physikalischen Randbedingungen des Endlagers ab. Neben dem geochemischen Milieu ist die Anwesenheit geeigneter Elektronenakzeptoren von zentraler Bedeutung. (Suter et al. 1999).

Wichtige mikrobielle Redoxprozesse sind:

1. Sauerstoffaufzehrung (Aerobe Atmung)
2. Nitratreduktion
3. Eisenreduktion
4. Sulfatreduktion
5. Methangärung

Detaillierte Beschreibungen der Prozesse und deren Bedeutung für das geochemische Milieu finden sich z. B. bei Chapelle (2000). Suter et al. (1999) zeigt die Bedeutung dieser Prozesse für die Langzeitsicherheit des ERAM auf.

Die Reihenfolge der Reaktionen wird durch die freie Reaktionsenthalpie bestimmt, d. h. eine Nitratreduktion kann erst stattfinden, wenn der Sauerstoff aufgezehrt wurde und das Redoxpotential einen gewissen Wert unterschritten hat usw. Allerdings gilt diese Reihenfolge für das gesamte Grubengebäude nur bei der durchgehend begrenzten Verfügbarkeit von Elektronendonatoren, z. B. Kohlenwasserstoffe. Wird der Metabolismus von Mikroorganismen bei reichlich vorhandenen Elektronendonatoren durch die begrenzte Verfügbarkeit von Elektronenakzeptoren limitiert, so kann sich eine umgekehrte Reihenfolge einstellen.

70.3 Sachlage am Standort

Untersuchungen zum Vorhandensein von Mikroorganismen wurden im Erkundungsbergwerk am Standort Gorleben bisher nicht durchgeführt. Unter den anaeroben Bedingungen, die sich im Endlager vor allem durch Korrosionsprozesse schnell einstellen, spielen voraussichtlich Methanogenese und Sulfatreduktion eine Rolle. Die Methanogenese findet nach heutigem Kenntnisstand nur bei Salzgehalten unter etwa 90 g/l statt, die Sulfatreduktion kann auch bei hochsalinaren Lösungen (bis zu 350 g/l beobachtet werden (Oren 2011)). Die mikrobielle Sulfatreduktion ist auf Grund der Anhydritgehalte in den Salzgesteinen zu betrachten. Treten lokal hohe Konzentrationen an Magnesiumchlorid (Versatzfeuchte und Bestandteil des Sorelbetons in den Verschlussbauwerken) auf, ist mit einer eingeschränkten Aktivität von Mikroorganismen zu rechnen.

Werden mit den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen Nitrate im Endlager eingelagert, ist auch Nitratreduktion ein zu betrachtender Prozess.

Die mikrobielle Sulfatreduktion im Hutgestein wird im FEP Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge behandelt.

70.4 Standortspezifische Auswirkungen

Auf Grund der geringen Datenlage zu den am Standort Gorleben vorhandenen Mikroorganismen können die standortspezifischen Auswirkungen derzeit nicht abgeschätzt werden. Es ist aber damit zu rechnen, dass insbesondere durch die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle sowohl Nährstoffe (Zellulose, Kunststoffabfälle, Bitumenabfallprodukte) als auch Oxidationsmittel (Nitrate) zur Verfügung stehen und es zur Bildung von anorganischem Kohlenstoff kommt.

Bei der Anwesenheit von organischem Material sind mikrobielle Prozessen in der Regel mit der Bildung von Gasen verbunden. Die Auswirkungen dieser Gasbildung werden daher im FEP Zersetzung von Organika beschrieben.

Durch die Reaktionsprodukte von mikrobiellen Prozessen kann das lokale geochemische Milieu und insbesondere die Redoxbedingungen verändert werden. Dabei kann es auch zu einer direkten Reduktion oder Oxidation von Radionukliden kommen.

70.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

70.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

70.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

70.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

70.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung in den Teilsystemen: Mikrobielle Prozesse laufen zumindest im geringen Umfang im Nahfeld, dem Wirtsgestein und den übrigen Strecken und Schächten ab. Definitionsgemäß wird das Deck- und Nebengebirge nicht behandelt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Über die Zersetzung von Organika besteht eine Beeinflussung über mehrere andere FEP auf die Initial-Barrieren. Diese wird als "nicht zutreffend" klassifiziert.

70.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Versatz

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Wärmeproduktion

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Begründungen:

Lösungen im Grubenbau: Mikrobielle Prozesse sind in der Regel an das Vorhandensein von Wasser gebunden.

Inventar: Organika, Kohlenwasservorkommen im Wirtsgestein: Mikrobielle Prozesse sind in der Regel an das Vorhandensein von organischem Material gebunden (Kohlenstoff- und Energiequelle).

Inventar: Sonstige Stoffe, Versatz: Können Stoffe (vor allem Sulfat) enthalten, die Mikroorganismen zur anaeroben Atmung verwenden.

Wärmeproduktion, Geochemisches Milieu im Grubenbau: Temperatur und geochemisches Milieu bestimmen den Ablauf der mikrobiellen Prozesse.

Bemerkungen:

Wirtsgestein: In den nicht aufgeschlossenen Bereichen haben sich die Bedingungen nicht geändert und daher sind keine Einflüsse zu erwarten.

Fluiddruck: Die Einflüsse der Druckverhältnisse unter Endlagerbedingungen auf die mikrobiellen Prozesse können vernachlässigt werden.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Versatz

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Zersetzung von Organika

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Komplexbildung

Begründungen:

Inventar: Organika: organische Stoffe können durch mikrobielle Prozesse zersetzt werden. Versatz, Inventar: Sonstige Stoffe: Nitrate, Sulfate, Karbonate können reduziert werden.

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein: Können durch Mikroorganismen abgebaut werden.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Mikrobielle Prozesse haben Einfluss auf das geochemische Milieu.

Zersetzung von Organika: Mikrobielle Prozesse können zu einem Abbau von Organika führen.

Bemerkungen:

Inventar: Organika: Der Abbau von Organika reduziert das Inventar, wird aber mit dem FEP Zersetzung von Organika behandelt.

Behälter: Der Einfluss auf die Behälter wird mit dem FEP Zersetzung von Organika behandelt.

Wirtsgestein: In den nicht aufgeschlossenen Bereichen haben sich die Bedingungen nicht geändert. Daher sind keine Beeinflussungen zu erwarten.

70.11 Offene Fragen

- Relevanz der mikrobiellen Prozessen im Grubengebäude
- Bedeutung von Nitratgehalten in verglasten Abfällen

70.12 Literaturquellen

Chapelle, F.H. (2000): The significance of microbial processes in hydrogeology and geochemistry. - Hydrogeology Journal 8: 41-46.

Hallsworth, J.E., Yakimov, M.M., Golyshin, P.N. Gillion. J.L.M., D'Auria, G., De Lima Alves, F., La Cono, V., Genovese M., McKew, B.A., Hayes, S.L., Harris, G., Guliano, L., Timmis, K.N. McGenity, T.J. (2007): Limits of life in MgCl₂-containing environments: chaotropy defines the window. - *Environmental Microbiology* 9(3): 801-813.

Oren, A. (2011): Thermodynamic limits to microbial life at high salt concentrations. - *Environmental Microbiology* 13(8):1908-23.

Spark, I., Patey, I., Duncan, B., Hamilton, A., Devine, C., McGovern-Traa, C. (2000): The effects of indigenous and introduced microbes on deeply buried hydrocarbon reservoirs, North Sea. *Clay Minerals* 35: 5-12.

Suter, D., Blaser, P., Brandl, H., Fritz, M. (1999): Gasentwicklung im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) durch mikrobielle Aktivitäten und radiolytische Prozesse. Colenco-Bericht 4149/28, Colenco Power Engineering AG; Baden, Schweiz.

Weiterführende Literatur:

Askarieh, M.M., Chambers, A.V., Daniel, F.B.D, Fitzgerald, P.L., Holtom, G.J., Pilkington N.J., Rees J.H. (2000): The chemical and microbial degradation of cellulose in the near field of a repository for radioactive wastes. - *Waste Management* 20: 93-106.

Francis, A.J., Gillow, J.B. (1994): Effects of microbial processes on gas generation under expected Waste Isolation Pilot Plant repository conditions. SAND93-7036, UC-721; Albuquerque, New Mexico.

Schlegel, H.G. (1985): *Allgemeine Mikrobiologie*. - G. Thieme Verlag; Stuttgart.

71 Wärmeproduktion (2.1.11.01)

71.1 Definition/Kurzbeschreibung

Im FEP Wärmeproduktion werden alle nicht klimatischen Phänomene zusammengefasst, die bei der zeitlichen Entwicklung der Temperatur im Endlagersystem berücksichtigt werden müssen.

71.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das FEP Wärmeproduktion wirkt eigentlich indirekt über die Temperatur. Alle physikalischen FEP, die mit der Wärmeausbreitung zusammenhängen (Temperatur, Wärmeleitung, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturgradient, usw.) werden aber nicht als eigenständige FEP in diesem Katalog aufgeführt.

Die Temperatur ist eine grundlegende Größe, die auf viele andere FEP einwirkt. Das Wissen über diese Größe ist in vielen Lehrbüchern beschrieben (z. B. Baehr & Stephan 2010).

Das natürliche Temperaturfeld wird durch den terrestrischen Wärmestrom verursacht. Der terrestrische Wärmestrom beträgt in Mitteleuropa im Durchschnitt 60 bis 80 mW pro m², in Norddeutschland ist er mit 60 mW pro m² im unteren Bereich dieser Spanne (Walter 1995). Der Temperaturgradient ergibt sich aus dem terrestrischen Wärmestrom und der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine. Ein Durchschnittswert für Mitteleuropa ist etwa 1 °C pro 30 m. Da Salze eine höhere Wärmeleitfähigkeit als andere Gesteine haben, wird in einem Salzstock die Wärme bevorzugt weitergeleitet und bei einem konstanten terrestrischen Wärmestrom der geothermische Tiefengradient dementsprechend gesenkt. Modellrechnungen von Delisle (1980) zeigen, dass dieser Effekt gering ist und auf die Temperaturentwicklung in einem Endlager keine Auswirkungen hat.

71.3 Sachlage am Standort

Mit Hilfe von Temperaturmessungen in den Tiefbohrungen Go 1003, Go 5001 und Go 5002 sowie in acht untertägigen geologischen Erkundungsbohrungen auf der 840-m-Sohle des Erkundungsbergwerkes Gorleben wurde das natürliche ungestörte

Temperaturfeld des Erkundungsbereiches 1 (EB1) bestimmt. Im Niveau der 840-m-Erkundungssohle beträgt die mittlere Gesteinstemperatur 37,97 °C. Der vertikale Temperaturgradient beträgt 2,35 K pro 100 m (Grissemann & Czora 2003)

Im Grubengebäude am Standort Gorleben sind außer dem radioaktiven Zerfall kaum Prozesse denkbar, die zu einer signifikanten Temperaturerhöhung im Salzgestein führen können. Exotherme Prozesse, die im Endlagersystem ablaufen, sind die Korrosionsprozesse oder die thermochemische Sulfatreduktion. Auch bei der Rückreaktion von Radiolyseprodukten zu Steinsalz können geringe Mengen an Wärme entstehen. Die Wärmeproduktion dieser Prozesse wird aber gegenüber der Wärme aus dem radioaktiven Zerfall vernachlässigt.

Bei der Wirtsfornation Salz ist der durch die Zerfallswärme der Radionuklide bewirkte Wärmeeintrag insbesondere bezüglich Konvergenz und auftretende Spannungen Ganzes bedeutsam. Die Auslegung des Endlagers erfolgt derart, dass sowohl bei der Streckenlagerung als auch bei der Bohrlochlagerung eine Kontakttemperatur zwischen Behälter und Salz von 200 °C nicht überschritten wird.

Diese Maximaltemperatur begründet sich zum einen

- um die chemische Stabilität der kristallwasserhaltigen Salzgesteine zu gewährleisten (Rothfuchs 1986) und zum anderen
- um die Zentraltemperatur innerhalb der HAW-Kokillen zu minimieren, damit die chemische Integrität deren Glasmatrix nicht beeinträchtigt wird. (Merz 1979, Freude 1985).

71.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Änderung der Temperatur hat Einfluss auf viele FEP im Endlagersystem. Sie wirkt sich auf die Reaktionsgeschwindigkeit von chemischen Vorgängen, auf die Spannungen und Verformungen des Wirtsgesteins und auf das Materialverhalten der Barrieren des Endlagersystems aus. Die entsprechenden Auswirkungen werden in den jeweiligen FEP beschrieben.

Des Weiteren bewirkt die Wärme aus den Zerfallsprozessen eine lokale Temperaturänderung und kann zu Temperaturgradienten führen. Temperaturgradienten können

advective und konvektive Bewegungen von Fluiden verursachen und damit den Transport von gelösten Stoffen beeinflussen.

71.5 Zeitliche Beschränkung

Aufgrund der langen Halbwertszeiten einzelner radioaktiver Elemente ist der Prozess innerhalb des Betrachtungszeitraums für Langzeitsicherheitsanalysen noch nicht abgeschlossen.

Nach wenigen tausend Jahren hat sich die Temperatur im Endlager aber wieder dem Ausgangszustand angenähert.

71.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

71.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

71.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

71.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Auf Grund der eingelagerten radioaktiven Abfälle ist dieses FEP gewiss und muss in allen Teilsystemen berücksichtigt werden.

Wirkung in den Teilsystemen: Der durch die Zerfallswärme der Radionuklide bewirkte Wärmeeintrag breitet sich über alle Teilsysteme aus und muss daher im gesamten Endlagersystem berücksichtigt werden.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Es hat über einige andere FEP (z. B. Auflösung und Ausfällung) einen indirekten Einfluss auf die Initial-Barrieren.

71.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Radioaktiver Zerfall

Begründungen:

Radioaktiver Zerfall: Die Energie der beim radioaktiven Zerfall emittierten Strahlung wandelt sich durch Wechselwirkungen mit Materie in Wärme um.

Bemerkungen:

Korrosionsprozesse, Thermochemische Sulfatreduktion, Radiolyse, Mikrobielle Prozesse: Die bei diesen Prozessen erzeugte Wärme kann gegenüber der Zerfallswärme aus den Abfällen vernachlässigt werden.

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP:

Thermische Expansion oder Kontraktion

Begründungen:

Thermische Expansion oder Kontraktion: Eine Temperaturerhöhung führt zu einer Expansion der erwärmten Materialien.

Beeinflusste FEP:

Versatz

Bohrlochverrohrung

Fluiddruck

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Zersetzung von Organika

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Verdampfen von Wasser

Radiolyse

Wirtsgestein

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Thermomigration

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Fluiddruck: Das Volumen von Gasen ist abhängig von der Temperatur.

Auflösung und Ausfällung, Korrosionsprozesse, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails, Zersetzung von Organika, Mikrobielle Prozesse im Grubenbau, Verdampfen von Wasser, Thermomigration, Thermochemische Sulfatreduktion, Radiolyse: Alle diese Prozesse werden von der Temperatur beeinflusst.

Wirtsgestein, Versatz: Die Temperatur ändert vor allem die Kriechfähigkeit des Steinsalzes.

Bohrlochverrohrung: Die Temperaturentwicklung wirkt auch auf die Materialien der Bohrlochverrohrung ein.

Lösungen im Grubenbau: Die Temperatur ändert Fluideigenschaften (z. B. Viskosität).

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Temperatur beeinflusst viele geochemische Prozesse.

Bemerkungen:

Subrosion: Die Temperatur hat Einfluss auf Löslichkeiten von Salzen. Subrosion wird über das FEP Auflösung und Ausfällung indirekt abgedeckt.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude, Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Konvektionsströmungen werden von der Temperatur beeinflusst. Diese läuft indirekt über das FEP Thermische Expansion oder Kontraktion.

71.11 Offene Fragen

Keine.

71.12 Literaturquellen

Baehr, H.D., Stephan, K. (2010): Wärme- und Stoffübertragung. - 7. Auflage, Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg.

Delisle, G. (1980): Berechnungen zur raumzeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes um ein Endlager für mittel- und hochaktive Abfälle in einer Salzformation. - Z. dt. geol. Ges. 131: 461-482.

Freude, E. (1985): Quellterm für die Mobilisierung von Radionukliden aus verglastem Abfall. - Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Fachband 10; Berlin.

Grisseemann, C., Czora, C. (2003): Projekt Gorleben - Temperaturmessungen von der Erkundungssohle - Das natürliche Temperaturfeld im Erkundungsbereich. - BGR; Hannover.

Merz, E. (1979): Endlagerformen für hochradioaktive Spaltproduktabfälle. - Atomwirtschaft 24, August/September 1979: 409-413.

Rothfuchs, T. (1986): Untersuchung der thermisch induzierten Wasserfreisetzung aus polyhalitischem Steinsalz unter In-situ-Bedingungen. Temperaturversuch 5 im Salzbergwerk Asse. - Abschlussbericht, Kommission der Europäischen Gemeinschaft, EUR 10392 DE; Brüssel.

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) (2005): RSK-Stellungnahme: Sicherheitstechnische Aspekte konzeptioneller Fragestellungen zur Endlagerung von bestrahlten Brennstäben mittels Kokillen in Bohrlöchern anhand eines Vergleiches mit dem Konzept „Streckenlagerung von dickwandigen Behältern“ (380. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Walter, R. (1995): Geologie von Mitteleuropa. 6. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung; Stuttgart.

72 Thermische Expansion oder Kontraktion (2.1.11.02)

72.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter thermischer Expansion bzw. thermischer Kontraktion versteht man die Volumenzunahme bzw. -abnahme eines Stoffes, die durch eine Veränderung seiner Temperatur hervorgerufen wird.

72.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Kann sich ein Stoff aufgrund einer äußeren Einspannung nicht ausdehnen, so steigt in Abhängigkeit von der Kompressibilität des Stoffes der Druck bzw. die Spannung im Inneren des Stoffes an.

Die wesentlichen thermischen Prozesse, die in einem Endlagersystem zur Expansion oder Kontraktion des Wirtsgesteins bzw. eingebrachter Materialien (geotechnischer Barrieren, Abfallgebinde, technische Einrichtungen) führen können, sind die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle sowie starke Klimaänderungen (Kaltzeiten).

Bei der Errichtung der Verschlussbauwerke kann es durch den Abbindeprozess des Betons lokal und zeitnah nach dem Verschluss des Endlagers zu zusätzlichen Temperaturerhöhungen kommen. Diese werden aber bei der Auslegung des Endlagers und der Bauwerke als Randbedingung berücksichtigt und sind daher im Rahmen des FEP-Kataloges nicht von Bedeutung.

Der Prozess der thermischen Expansion bzw. Kontraktion muss in Verbindung mit der Wärmeleitung und -speicherung in gekoppelten thermomechanischen Modellberechnungen berücksichtigt werden, um die für die Integrität der Barrieren, insbesondere des Wirtsgesteins, ausschlaggebenden Spannungsverhältnisse korrekt zu ermitteln.

72.3 Sachlage am Standort

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in den Ostflügel des Endlagers kommt es in der frühen Nachverschlussphase zu einem starken Anstieg der Temperatur im Nahfeld (max. Temperatur an der Behälteroberfläche 200 °C). Die Ausbreitung des Temperaturfeldes und die resultierende Expansion des Wirtsgesteins hängen u. a.

von den thermischen Eigenschaften des Versatzes und vom Endlagerkonzept ab (rasche Anbindung an das Gebirge bei der Bohrlochlagerung, langsamere Anbindung in den großen Einlagerungsstrecken). Durch die thermische Expansion des Gebirges werden zusätzliche Spannungen im Wirtsgestein induziert, die einerseits zu dilatanten Gefügeschädigungen an den Streckenkonturen und andererseits zur Ausbildung eines Bereiches erhöhter Druckspannungen außerhalb des geschädigten Bereiches führen können (Kock et al. 2012). Hierdurch kann es am Salzspiegel zu einer Hebung kommen, die mit einer Reduzierung der minimalen Hauptspannung verbunden ist. Sobald die minimale Hauptspannung am Salzspiegel unter den dort anstehenden hydrostatischen Lösungsdruck abfällt, können hydraulische Wegsamkeiten aufreißen. Mit Abklingen der Wärmeproduktion kommt es zu einer Kontraktion des Gebirges und zu kompressiblen Verhältnissen am Salzspiegel.

Die Auswirkungen der Erwärmung von Gebirge und Barrieren, die resultierende thermische Ausdehnung und die thermomechanischen Spannungen werden bei den Auslegungsrechnungen für die geotechnischen Barrieren berücksichtigt.

Weiterhin können durch gravierende Klimaänderungen (vor allem Kaltzeiten) Temperaturänderungen im Deckgebirge und in den oberen Teilen des Wirtsgesteins auftreten. Eine tiefreichende Abkühlung des Gebirges führt zur Gesteinskontraktion, durch die (kryogene) Risse im Gebirge aufreißen können. Je nach der Intensität der Abkühlung können von diesen Prozessen auch die oberen Dichtelemente der Schachtverschlüsse betroffen sein. Dies ist aber sicherheitstechnisch nicht relevant, da derartige kaltzeitliche Entwicklungen erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auftreten können.

Der Ablauf und die Konsequenzen der thermomechanischen Prozesse im Endlager-system werden im Zuge der Integritätsnachweise für das Wirtsgestein und für die geotechnischen Barrieren analysiert.

72.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges kommt es zur thermischen Expansion bzw. bei einer späteren Abkühlung zur Kontraktion der Gesteine. Dadurch werden Verformungen und Spannungsänderungen in das Gebirge eingetragen, die sich auf die Integrität der geo-

logischen Barriere und der geotechnischen Barrieren auswirken können (Nipp & Heusermann 2000, Kock et al. 2012). In der Folge werden Wechselwirkungen zwischen den Behältern, dem Gebirge und den geotechnischen Barrieren auftreten. An den Streckenkonturen können dilatante Gefügeschäden auftreten. Außerdem bildet sich ein Bereich erhöhter Druckspannungen außerhalb der gestörten Zone. Damit verbunden sind Hebungen, die sich bis zur Tagesoberfläche fortsetzen.

Bedingt durch die Aufheizung und Hebung wird der Spannungszustand im Salzstock großräumig verändert (Kock et al. 2012). Am Salzspiegel kommt es aufgrund der Volumendehnung zu einer Reduzierung der minimalen Hauptspannung. Sobald diese unter den dort anstehenden hydrostatischen Lösungsdruck abfällt, kann es zu einer Fluiddruck-getriebenen Permeation an steil stehenden Schichtflächen kommen.

Sinken die Temperaturen aufgrund des fortschreitenden radioaktiven Zerfalls später wieder ab, so kommt es in größeren Teufenlagen zur Gesteinskontraktion (Nipp & Heusermann 2000). Dadurch stellen sich am Salzspiegel kompressive Verhältnisse ein.

Die Abkühlung infolge einer Kaltzeit wirkt sich nur im Deckgebirge sowie - bei tief reichendem Permafrost - in den obersten Teilen des Salzstocks aus. Durch thermomechanische Untersuchungen ist zu analysieren, ob am Standort Gorleben bei zukünftigen Kaltzeiten kryogene Klüfte im Wirtsgestein auftreten können und ob die oberen Dichtelemente der Schachtverschlüsse durch glazigene Einflüsse betroffen sind. Eine Kaltzeit mit tief reichender Abkühlung des Gebirges ist erst zu späten Zeiten (ab 50.000 Jahre) zu erwarten. Zu diesem Zeitpunkt bestehen keine Anforderungen mehr an die Standsicherheit der Schachtverschlüsse.

72.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Während die maximalen Temperaturen durch die wärmeentwickelnden Abfälle im Nahfeld nach einigen zehner Jahren auftreten, erreicht die Temperaturfront den Salzspiegel erst nach wenigen hundert Jahren (Nipp & Heusermann 2000, Kock et al. 2012). Eine Kaltzeit mit tiefreichender Abkühlung des Gebirges ist ab 50.000 Jahren zu erwarten.

72.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

72.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

72.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

72.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Bei Temperaturänderungen gehört die thermische Expansion und Kontraktion zu den stoffspezifischen Eigenschaften und wird daher "wahrscheinlich" eintreten.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Der FEP wirkt nur indirekt, z. B. über "Spannungsänderung und Spannungsumlagerung", auf die Initial-Barrieren ein.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist in den Teilsystemen "Nahfeld", "Strecken und Schächte" und "Wirtsgestein" zu berücksichtigen. Temperaturänderungen im Deck- und Nebengebirge sind sicherheitstechnisch nicht relevant.

72.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Permafrost

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Wärmeproduktion

Begründungen:

Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, vollständige Inlandvereisung: Durch Klimaentwicklungen bedingte tief reichende Temperaturänderungen des Gebirges können zu Kontraktionen oder, bei anschließender Erwärmung, zur Expansion im Deckgebirge, den obersten Bereichen des Wirtsgesteins sowie in den oberen Teilen des Schachtverschlusses führen. Warmzeiten werden nur indirekt über das FEP globale Klimaänderungen berücksichtigt.

Wärmeproduktion: Aus der Wärmeproduktion durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle resultiert die Aufheizung und Expansion des Salzgebirges und der geotechnischen Barrieren. Bei Abklingen der Aufheizung kommt es zur Kontraktion.

Bemerkungen:

Inlandvereisung in randlicher Lage umfasst Bereiche mit Permafrost und solche mit Inlandvereisung und wird daher hinsichtlich seiner Auswirkungen durch die beiden entsprechenden FEP abgedeckt.

Beeinflussende FEP:

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Verschlussmaterial

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung
Wirtsgestein

Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Abfallmatrix, Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Versatz, Verschlussmaterial, Technische Einrichtungen, Bohrlochverrohrung, Wirtsgestein, Deck- und Nebengebirge: Die spezifischen Eigenschaften der genannten Stoffe bestimmen die Expansion und Kontraktion dieser Materialien.

Resultierende FEP:

Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges

Begründungen:

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die durch Volumenzunahme bzw. -abnahme bedingte Expansion bzw. Kontraktion führt zu Spannungsänderungen bzw. Spannungsumlagerungen im jeweiligen Stoff.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Aus thermischen Expansion oder Kontraktion der Baustoffe oder des Gebirges resultiert eine Lageverschiebung.

Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges: Die Expansion oder Kontraktion des Salzgebirges führt zu entsprechenden Bewegungen des Deckgebirges.

Beeinflusste FEP:

Abfallmatrix
Brennelement-Behälter
Sonstige Endlagerbehälter
Versatz
Verschlussmaterial
Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse
Sonstige Verschlussbauwerke
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Bohrlochverrohrung
Fluiddruck
Porosität
Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Auflockerungszone
Wirtsgestein

Begründungen:

Abfallmatrix, Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Bohrlochverrohrung, Versatz, Verschlussmaterial, Technische Einrichtungen, Bohrlochverrohrung, Wirtsgestein: Die thermische Expansion bzw. Kontraktion beeinflusst die Eigenschaften der genannten Materialien.

Schacht- und Streckenverschlüsse, sonstige Verschlussbauwerke: Außerdem wird die Funktion der Verschlussbauwerke beeinflusst.

Fluiddruck, Porosität, Auflockerungszone: Die thermische Expansion oder Kontraktion von Behältern und Gebirge beeinflussen den Fluiddruck sowie die Porosität im Versatz und in der Auflockerungszone.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Jede Volumenänderung hat auch Auswirkungen auf die Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

Wirtsgestein, Auflockerungszone: Die thermische Expansion und Kontraktion beeinflusst das Wirtsgestein und die Eigenschaften der Auflockerungszone.

Bemerkungen:

Versagen eines Brennelement-Behälters, Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Die Behälter sind entsprechend der Aufheizung durch die wärmeentwickelnden Abfälle ausgelegt, so dass Expansion und Kontraktion nicht den Behälterausfall beeinflussen.

Konvergenz, Salzgruskompaktion, Quellen des Bentonits, Gasvolumen im Grubenbau: Die thermische Expansion oder Kontraktion wirkt nicht direkt, sondern indirekt über die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen auf die genannten Prozesse.

Gaseindringdruck: Die thermische Expansion oder Kontraktion beeinflusst nur indirekt über die Porosität den Gaseindringdruck.

72.11 Offene Fragen

Keine.

72.12 Literaturquellen

Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P., (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Nipp, H.K, Heusermann, S. (2000): Erkundungsbergwerk Gorleben. Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB 1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK 3). Ergebnisbericht. - BGR, unveröffentl. Bericht, 0120209, 45 S., 8 Tab., 92 Anl.; Hannover.

73 Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

73.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Verdampfen von Wasser beschreibt den Phasenübergang des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand.

73.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Verdampfen im engeren Sinne bezeichnet den Phasenübergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand am Siedepunkt. Der Phasenübergang unterhalb des Siedepunktes wird als Verdunstung bezeichnet. Im FEP wird mit dem Prozess "Verdampfen" allgemein der Phasenübergang des Wassers vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand bezeichnet.

Das Verdampfen hängt von der Temperatur und dem Druck in der Lösung und der Gasphase ab. Der Siedepunkt von Wasser bei Atmosphärendruck liegt in Abwesenheit anderer Stoffe bei einer Temperatur von 100 °C, für eine gesättigte NaCl-Lösung bei ca. 108 °C (Becker et al. 2000). Mit zunehmendem Druck nimmt die Siedetemperatur des Wassers zu. Ab dem kritischen Punkt, der bei Wasser bei etwa 22,1 MPa und 374 °C liegt, kann nicht mehr zwischen den Aggregatzuständen flüssig bzw. gasförmig unterschieden werden.

73.3 Sachlage am Standort

Bei den vorliegenden Endlagerkonzepten (Bollingerfehr et al. 2011) werden durch die Wärmeproduktion der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle an der Oberfläche der Behälter Temperaturen von maximal 200 °C entstehen und somit Bereiche in unmittelbarer Nähe zu den Abfällen signifikant aufgeheizt. Daher kann aus den wässrigen Lösungen in den versetzten Strecken in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung und den herrschenden Druckbedingungen Wasser verdampfen.

73.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das Verdampfen von Wasser aus den wässrigen Lösungen führt zur Ausfällung von Stoffen und zur Bildung von Gasen (siehe FEP Auflösung und Ausfällung bzw. Gasbildung). Wenn die Gase entweichen können, stehen die verdampften Lösungen nicht mehr für andere Prozesse zur Verfügung, z. B. Korrosion, Versatzkompaktion. Kondensieren die Dämpfe in kälteren Bereichen des Endlagers, können dort diese Prozesse ausgelöst oder beschleunigt werden. Durch die Bildung von Wasserdampf wird auch der Fluiddruck beeinflusst (indirekt über das FEP Gasbildung).

73.5 Zeitliche Beschränkung

Das Temperaturmaximum wird nach wenigen 100 Jahren erreicht, nach weniger als 1.000 Jahren werden die Temperaturen im Einlagerungsbereich unter 100 °C fallen und die Ausprägung dieses Prozesses lässt deutlich nach (Kock et al. 2012).

73.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

73.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

73.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

73.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Gemäß dem im Endlager herrschenden Temperaturen ein wahrscheinlicher Prozess.

Wirkung in den Teilsystemen: Gemäß den herrschenden Temperaturbedingungen ist dieses FEP im Nahfeld, den Strecken und Schächten und gegebenenfalls im Wirtsgestein zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Das Verdampfen von Wasser ist mit einer Gasbildung verbunden und hat daher über den Fluiddruck einen indirekten Einfluss auf die Initial-Barrieren. Ein Einfluss über mehrere FEP-Ebenen wird mit "nicht zutreffend" klassifiziert.

73.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Fluiddruck

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Wärmeproduktion

Begründungen:

Wärmeproduktion: Eine Erhöhung der Temperatur in der Umgebung der Abfälle führt bei Anwesenheit von Lösungen zu deren Verdampfen (Verdunsten bzw. bei Überschreiten des Siedepunktes kommt es zum Sieden.

Fluiddruck, Geochemisches Milieu im Grubenbau: Druckverhältnisse und Inhaltsstoffe im Wasser beeinflussen den Prozess.

Bemerkungen:

Gasmenge im Grubenbau: Der Wasserdampf in der Gasphase beeinflusst den Prozess indirekt über den Fluiddruck.

Resultierende FEP:

Gasbildung

Begründungen:

Gasbildung: Beim Verdampfen von Wasser bildet sich eine Gasphase.

Beeinflusste FEP:

Versatz

Lösungen im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Wirtsgestein

Begründungen:

Versatz, Wirtsgestein: Eine Austrocknung dieser Materialien ändert deren Kriecheigenschaften.

Lösungen im Grubenbau: Die lokale Lösungsmenge in einem Grubenbau wird beim Verdampfen von Wasser reduziert.

Auflösung und Ausfällung: Ein Verdampfen von Wasser führt bei gesättigten Lösungen zu einer Ausfällung von gelösten Inhaltsstoffen.

Bemerkungen:

Fluiddruck: Wird indirekt über die Gasbildung beeinflusst (analog Spannungsänderungen, Konvergenz etc.).

Metallkorrosion: Wird indirekt über die Lösungen im Grubenbau beeinflusst.

73.11 Offene Fragen

Reduzierung der Wassermenge im Nahfeld der Abfälle

73.12 Literaturquellen

Becker, D.-A., Bremer, N.-M., Richter, K.-J., Schneider, L., Storck, R. (2000): Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-164; Braunschweig.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P., (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

74 Gasbildung (2.1.12.01)

74.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP Gasbildung fasst alle FEP zusammen, bei denen Gas im Endlager gebildet wird. Dies sind die Korrosion von Metallen, das Verdampfen von Wasser, die Zersetzung organischer Bestandteile, die thermochemische Sulfatreduktion, die Radiolyse und die Korrosion der Brennstoffmatrix. Detailliertere Informationen sind gegebenenfalls den Beschreibungen der genannten einzelnen FEP zu entnehmen.

74.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Durch die in der Definition genannten Prozesse werden Gase im Endlager gebildet. Zusätzlich werden teilweise auch beim radioaktiven Zerfall Gase gebildet, wie z. B. beim Zerfall von Th-230 in Ra-226. Die Bildung von Gasen beim radioaktiven Zerfall ist jedoch hinsichtlich der gebildeten Gasmenge unbedeutend gegenüber den anderen genannten Gasbildungsprozessen.

Voraussetzung für die meisten Gasbildungsprozesse ist die Anwesenheit von Wasser. In einem Endlager für hochradioaktive Abfälle werden die größten Gasmengen durch die Korrosion von Metallen und die Zersetzung organischer Bestandteile erzeugt. Bei der Korrosion von Eisen entsteht Wasserstoff und bei der Zersetzung von Organika entstehen Kohlendioxid, Methan und je nach Zersetzungsprozess weitere Gase.

74.3 Sachlage am Standort

Potenziell gasbildende Stoffe liegen in den Abfallbinden, sonstigen metallischen und organischen Stoffen und evtl. Kohlenwasserstoffen im Wirtsgestein (siehe entsprechenden FEP) vor. Außerhalb der Einlagerungsorte eingebrachte potenziell gasbildende Stoffe in der Form von Einbauten und Gerätschaften werden so weit wie möglich vor dem Verschließen des Endlagers wieder entfernt. Ein Teil der gasbildenden Stoffe außerhalb der Einlagerungsorte wird jedoch im Endlager verbleiben, wie z. B. Gebirgsanker; die Gesamtmenge ist jedoch gering gegenüber jener in den Einlagerungsorten. Weitere Informationen über die Mengen in das Endlager eingebrachter, poten-

ziell gasbildender Stoffe geben auch die FEP über die Inventare von Metallen, Organika und sonstigen Stoffen.

Die Umsetzung potenziell gasbildender Stoffe erfolgt über Prozesse (Metallkorrosion, Verdampfen von Wasser, Zersetzung von Organika, Thermochemische Sulfatreduktion, Radiolyse und Korrosion der Brennstoffmatrix), die als eigene FEP abgebildet sind und am Standort eine Rolle spielen (siehe jeweilige FEP-Beschreibung). Quantitativ unbedeutend ist die Gasbildung durch den Zerfall von Radionukliden.

Für die Bildung von Gasen ist die Anwesenheit von Wasser notwendige Voraussetzung. Das jeweilige betrachtete Szenarium bestimmt dabei die zu berücksichtigenden Wassermengen (Rübel & Mönig 2008). Die Quellen für Lösungen im Grubenbau sind im FEP Lösungen im Grubenbau beschrieben.

74.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Gasbildung erhöht die Menge der Gase und somit auch den Druck in einem Grubenbau. Die Auswirkungen der Gasbildung hängen stark von den Gasbildungsraten ab. Ein Teil der im Endlager gebildeten und beim Verschließen des Endlagers bereits vorhandenen Gase verhält sich chemisch inert (N_2 , Edelgase). Andere Gase haben hingegen einen relevanten Einfluss auf das chemische Milieu und davon indirekt abhängige Prozesse, wie z. B. die Korrosion von Abfallmatrices und Behältermaterialien (RSK 2005). Dies sind von den ursprünglich im Endlager befindlichen Gasen vor allem Sauerstoff, Kohlendioxid und eventuell Methan und bei den im Endlager gasbildenden Stoffen zusätzlich noch Wasserstoff und weitere Kohlenstoffverbindungen. Wasserstoffgas kann außerdem die Versprödung von Metallen verursachen (siehe FEP Materialversprödung durch Wasserstoff).

74.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Die Gasbildung hört jedoch auf, sobald die gasbildenden Materialien oder die verfügbare Wassermenge aufgebraucht sind.

74.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

74.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

74.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

74.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Eine Gasbildung findet zwangsläufig statt, sobald einer der unter "Auslösende FEP" genannten Gasbildenden Prozesse stattfindet.

Wirkung in den Teilsystemen: Gasbildung im Endlager findet im Nahfeld und den Strecken und Schächten durch die Korrosion eingebrachter Stoffe statt. Ist per Definition nur in diesen Teilsystemen zu betrachten. Im Wirtsgestein erfolgt bei der Bohrlochlagerung eine Gasbildung durch die Radiolyse auf Grund der Strahlung aus nicht abgeschirmten hochradioaktiven Abfällen bei der Bohrlochlagerung (HAW-Kokillen) und der thermochemischen Sulfatreduktion. Diese wird in den entsprechenden FEP behandelt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Gasbildung wirkt über zwei Ebenen, die Gasmenge im Grubenbau und den Fluiddruck, auf die Initial-Barrieren. Eine Beeinflussung über mehrere Ebenen wird mit "nicht zutreffend" charakterisiert.

74.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Zersetzung von Organika

Verdampfen von Wasser

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Metallkorrosion: Die anaerobe Eisenkorrosion führt zu einer Bildung von H_2 unter Verbrauch von Wasser. Auch bei der Korrosion anderer unedler Metalle wird Gas gebildet.

Korrosion der Brennstoffmatrix: Bei der Matrixkorrosion werden radioaktive Gase gebildet. Dies betrifft z. B. die Bildung von radiokohlenstoffhaltigen Gasen aus in der Brennstoffmatrix vorhandenen Kohlenstoffverbindungen (z. B. Carbiden). Im Zusammenhang mit den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ist auch eine Gasproduktion mit der Korrosion dieser Abfallmatrices verbunden.

Zersetzung von Organika: Die mikrobielle Zersetzung von Organika führt direkt zu einer Bildung von Gasen, wie z. B. CO_2 .

Verdampfen von Wasser: Beim Phasenübergang wird Wasser in den gasförmigen Zustand überführt.

Thermochemische Sulfatreduktion: Die Reduktion von Sulfat unter erhöhter Temperatur führt zur Bildung von Gasen, wie z. B. H_2S .

Bemerkungen:

Die Bildung von Gasen beim radioaktiven Zerfall ist quantitativ unbedeutend.

Beeinflussende FEP:

Radiolyse

Begründungen:

Radiolyse: Die Radiolyse kann zur Gasbildung führen, wie z. B. bei der Aufspaltung von Wasser in H_2 und O_2 .

Bemerkungen:

Behälterausfall: Wirkt nur indirekt auf einige der auslösenden FEP und wird daher nicht betrachtet.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Gasmenge im Grubenbau

Begründungen:

Gasmenge im Grubenbau: Die Bildung von Gasen erhöht direkt die Menge von Gasen im Grubenbau.

Bemerkungen:

Geochemisches Milieu, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme und Fluiddruck sind alle indirekt abhängig über die Gasmenge.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Das FEP Gasbildung bezieht sich per Definition nur auf das Endlager, die Gasbildung im Wirtsgestein wird direkt über die FEP Radiolyse und Thermochemische Sulfatreduktion abgefahren.

74.11 Offene Fragen

Der Forschungsbedarf zur Gasproduktion wird in den Beschreibungen der einzelnen gasbildenden Prozesse identifiziert.

74.12 Literaturquellen

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) (2005): RSK-Stellungnahme: Gase im Endlager (379. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Rübel, A., Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit PTKA-WTE. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

Weiterführende Literatur:

Müller-Lyda, I. (ed.) (1997): Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-129; Braunschweig.

Rübel, A., Noseck, U., Müller-Lyda, I., Kröhn, K.-P., Storck, R (2004): Konzeptioneller Umgang mit Gasen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-205; Braunschweig.

Schulze, O. (2002): Auswirkung der Gasentwicklung auf die Integrität geringdurchlässiger Barrieregesteine. - BGR, unveröffentl. Ber.: 142 S., 27 Abb., 4 Tab., Anh. A-G; Hannover.

Skrzyppek, J., Mayer, G., Wilhelm, S., Niemeyer, M., Folle, S., Rolfs, O., Suter, D. (2005): Untersuchungen der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit. - Colenco Bericht 3161/28, Colenco Power Engineering; Baden, Schweiz.

75 Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)

75.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses FEP beschreibt die in einem Grubenbau vorliegende Menge an Gasen.

75.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Gasmenge in einem Grubenbau ist zeitlich veränderlich. Die Menge an Gasen wird üblicherweise in Mol angegeben. Die nach dem Verschließen des Endlagers im Endlager entstehenden Gase werden im FEP Gasbildung behandelt.

Das Gasvolumen, das die Gasmenge einnimmt, ergibt sich unter der Berücksichtigung der Randbedingungen der herrschenden Temperatur und des Fluiddrucks im Grubenbau (siehe FEP Fluiddruck). Die Gase können sich entsprechend ihrer Löslichkeit in der flüssigen Phase lösen. Gase wie CO₂ stehen mit der Lösung und auch mit festen Phasen im Gleichgewicht.

75.3 Sachlage am Standort

Zum Zeitpunkt des Verschließens des Endlagers wird die Gasmenge der eingeschlossenen Luft in jedem Grubenbau durch das entsprechende freie Hohlraumvolumen bestimmt. Bei versetzten Strecken wird dieses Volumen durch die Porosität des Versatzes bestimmt.

Die Gasmenge in einem Grubenbau ist zeitlich veränderlich. Veränderungen können sich zum einen durch gasbildende und gasverbrauchende Prozesse und zum anderen durch Transportprozesse ergeben. Die Gasbildung ist in einem eigenen FEP beschrieben. Ein Verbrauch von Gasen ergibt sich z. B. beim Verbrauch von dem anfänglich in der Grubenluft enthaltenen Sauerstoff durch Korrosions- und Degradationsprozesse nach Verschließen des Endlagers. Transportprozesse führen zur Veränderung der Gasmenge durch den Zutritt oder Abfluss von Gasen aus, bzw. in das Wirtsgestein und benachbarte Grubenbaue. Diese Prozesse sind in den FEP Strömungsvorgänge im Grubengebäude und Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein beschrieben.

75.4 Standortspezifische Auswirkungen

Je nach den hydraulischen Gegebenheiten und der Temperatur ergibt sich aus dem herrschenden Fluiddruck das von der Gasmenge eingenommene Gasvolumen oder das für die Gasmenge verfügbare Gasvolumen bestimmt den Fluiddruck.

75.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

75.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

75.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

75.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

75.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Gasmengen sind im Endlager immer vorhanden.

Wirkung in den Teilsystemen: Die Gasmenge im Grubenbau ist im Nahfeld und den übrigen Strecken und Schächten zu berücksichtigen. Das Wirtsgestein und das Deckgebirge werden definitionsgemäß in diesem FEP nicht betrachtet.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Gasmenge wirkt über den Fluiddruck indirekt auf die Initial-Barrieren.

75.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Gasbildung

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Begründungen:

Gasbildung: Die Gasbildung führt zur Erhöhung der Gasmenge im Grubenbau.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Strömungsvorgänge von Gas und Flüssigkeit im Grubengebäude können die Gasmenge im Grubenbau verändern.

Fluidvorkommen und Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein: Fluid- und Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein enthalten in den meisten Fällen auch eine Gasphase. Diese Gas Mengen können in den Grubenbau zutreten. Da es keinen eigenen FEP für den Zutritt von Gasen in den Grubenbau gibt, werden diese Gase direkt bei der Gasmenge berücksichtigt.

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein: Die Infiltration von Gasen in das Wirtsgestein verringert die Gasmenge im Grubenbau.

Bemerkungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Wird nicht aufgeführt, das es nur indirekt über die Strömungsvorgänge im Grubengebäude wirkt.

Lösungen im Grubenbau: Wird nicht aufgeführt, da es nur indirekt über die Gasbildung wirkt.

Konvergenz, Fluiddruck, Versatzkompaktion, Porosität, Wärmeproduktion und Thermische Expansion oder Kontraktion: Wirken alle nur indirekt über Strömungsvorgänge oder Fluiddruck oder auf die Zustandsgröße der Temperatur.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Fluiddruck

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Veränderung der Gasmenge im Grubenbau kann Strömungsvorgänge von Gas und evtl. Flüssigkeit im Grubengebäude auslösen.

Fluiddruck: Es besteht nach dem Gasgesetz eine Wechselwirkung zwischen der Gasmenge, dem zur Verfügung stehenden Volumen, der Temperatur und dem Fluiddruck. Nur die Gasmenge und der Fluiddruck sind im FEP-Katalog als eigene FEP aufgeführt.

Thermochemische Sulfatreduktion: Die Gasmenge beeinflusst den Ablauf der Reaktion.

Geochemisches Milieu: Die Lösung von Gasen (z. B. H_2) in der flüssigen Phase beeinflusst das geochemische Milieu. Die Menge der gelösten Gase hängt dabei auch von der Menge der Gase in der Gasphase ab.

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Die Wasserstoffaufnahme und damit auch die Materialversprödung ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Wasserstoffmenge.

Bemerkungen:

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein: wird nicht aufgeführt, da sie nur indirekt über den Fluiddruck beeinflusst wird. (Übersteigt der Fluiddruck beim Vorhandensein einer Gasphase (Gasdruck) einen kritischen Wert, dann kann es zu einer Infiltration von Gas ins Wirtsgestein führen.)

Versatzkompaktion: Wird nur indirekt über den Fluiddruck beeinflusst.

75.11 Offene Fragen

Keine.

75.12 Literaturquellen

Weiterführende Literatur:

Müller-Lyda, I. (ed.) (1997): Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-129; Braunschweig.

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission): RSK-Stellungnahme: Gase im Endlager (379. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Rübel, A., Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit PTKA-WTE. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

76 Gaseindringdruck (2.1.12.03)

76.1 Definition/Kurzbeschreibung

Der Gaseindringdruck ist der Druck, den eine gasförmige Phase zusätzlich zum herrschenden hydraulischen Druck überschreiten muss, um in einem Zweiphasensystem (flüssig, gasförmig) die benetzende, flüssige Phase in einem porösen Feststoff verdrängen zu können.

76.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das FEP Gaseindringdruck bezieht sich auf das Eindringen von Gasen in geotechnische Barrieren, wie versetzte Strecken und Verschlussbauwerke. Typische Gaseindringdrücke für geotechnische Barrieren gibt z. B. Rodwell (1999). Demgegenüber wird das Eindringen von Gasen in das Wirtsgestein im FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein behandelt.

76.3 Sachlage am Standort

Gaseindringdrücke können in einem Endlager prinzipiell an unterschiedlichen Stellen auftreten. Da ein Endlager im Salz zu Beginn aber nicht lösungsgefüllt ist, gilt dies in diesem Fall nur für zwei Stellen:

zum einen für den Schachtverschluss am Übergang zum Deckgebirge und zum anderen für solche Verschlussbauwerke, die mit geringem Lösungsüberschuss hergestellt werden und somit von Beginn an lösungs gesättigt sind. Dies trifft z. B. üblicherweise auf Verschlussbauwerke aus Salzbeton sowie Sorelbeton zu (Angaben für Gaseindringdrücke für Teilkomponenten und Materialien in geotechnischen Barrieren finden sich bei Engelhardt et al. 2011, Müller-Hoeppe 2011).

Im Wirtsgestein Steinsalz liegen als Folge der sedimentären Genese im Intergranularraum immer lokale Lösungseinschlüsse und Laugenfilme vor, die ebenfalls kapillare Sperrdruckeffekte bedingen können. Diese liegen dann mutmaßlich im Bereich der Gebirgsspannungen (vgl. FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein).

76.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Im Bereich von Verschlussbauwerken können Gase solange über die Auflockerungszone entweichen, bis sie geschlossen bzw. verheilt ist oder durch zutretende Lösungen durchfeuchtet wird. Dann bleiben Gase in dem Grubenbau eingeschlossen, solange der Gaseindringdruck nicht erreicht wird. Bei einem Aufbau von sehr hohen Drücken können sich gegebenenfalls Wegsamkeiten im umgebenen Gestein bilden (siehe FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein). Wird der Gaseindringdruck dagegen überschritten, kann ein Gasstrom über ein Verschlussbauwerk (oder eine andere Wegsamkeit) einsetzen.

76.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

76.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

76.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

76.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

76.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Randbedingung.

Teilsysteme: Das Verdrängen einer benetzenden, flüssigen Phase in einem porösen Feststoff wird nur im Nahfeld und den übrigen versetzten Strecken und Schächten betrachtet. Wechselwirkungen zwischen flüssiger Phase und Gasphase im Deck- und Nebengebirge werden hier nicht betrachtet.

Einwirkung auf Initial-Barrieren: Das FEP wirkt erst über mehrere Ebenen auf Initial-Barrieren, daher wird die Einwirkung auf die Funktion der Initial-Barrieren als "nicht zutreffend" klassifiziert.

76.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Porosität

Permeabilität

Begründungen:

Schacht-/Streckenverschlüsse, sonst. Verschlussbauwerke: Die technische Auslegung der Verschlüsse führt zum Vorhandensein diskreter Wegsamkeiten (z. B. Öffnungsweite der Kontaktfuge), die letztlich den Gaseindringdruck kontrolliert.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: diese Prozesse können die Materialeigenschaften (z. B. durch Änderungen der Porenraumgeometrie) und damit das Gaseindringverhalten verändern.

Porosität: Der Gaseindringdruck hängt vom Kapillardruck im Material ab, welcher wiederum vom Porendurchmesser und somit indirekt von der Porosität abhängt.

Permeabilität: Bei der Bestimmung von Gaseindringdrücken wird ein empirischer Zusammenhang zwischen der Permeabilität und dem Gaseindringdruck festgestellt (z. B. Rodwell et al. 1999). Dieser geht auf die Abhängigkeit der Permeabilität von der Porosität und dem Porendurchmesser zurück.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Begründungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Wird der Gaseindringdruck überschritten kommt es zu einer Zweiphasenströmung in dem betroffenen Grubenbau.

76.11 Offene Fragen

Die Datenbasis für Gaseindringdrücke für Salzgrus mit unterschiedlichen Porositäten ist nicht ausreichend.

76.12 Literaturquellen

Engelhardt, H.H., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikation für Filter / Aufsättigungs- und Widerlager- / Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH; Peine.

Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, Minkel, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. - Abschlussbericht des Vorhabens SR 2470, Institutes für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Salzgitter.

Rodwell, W.R., Harris, A.W., Horsemann, S.T., Lalieux, P., Müller, W., Ortizamya, L., Pruess, K. (1999): Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste. A joint EC/NEA Status Report. -European Commission & Nuclear Energy Agency, EUR 19122 EN; Brüssel.

Weiterführende Literatur:

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) (2005): RSK-Stellungnahme: Gase im Endlager (379. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Rübel, A., Noseck, U., Müller-Lyda, I., Kröhn, K.-P., Storck, R. (2004): Konzeptioneller Umgang mit Gasen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-205; Braunschweig.

Rübel, A., Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz. - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

77 Zündfähige Gasgemische (2.1.12.04)

77.1 Definition/Kurzbeschreibung

Ein zündfähiges Gasgemisch liegt vor, wenn die Volumenverhältnisse des Gasgemischs innerhalb bestimmter Grenzen, den sogenannten Zündgrenzen liegen, so dass es prinzipiell zu einer Verbrennung kommen kann.

77.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Mit dem Verschluss des Endlagers wird Luft im Grubengebäude eingeschlossen. Weiterhin können im Laufe der Zeit durch die Korrosion metallischer oder die mikrobielle Zersetzung organischer Abfallbestandteile potenziell Gase im Endlager gebildet werden (siehe auch FEP Gasbildung), die prinzipiell zusammen mit der Luft zündfähige Gemische bilden können. Dies sind vor allem Wasserstoff und Methan. Die schnelle Verbrennung von H_2 und O_2 zu Wasser kann je nach Randbedingung entweder deflagrativ oder detonativ ablaufen. Von Deflagration wird gesprochen, wenn die Verbrennungsgeschwindigkeit geringer ist, als die Schallgeschwindigkeit im verbrennenden Medium und von einer Detonation, wenn die Verbrennungsgeschwindigkeit höher ist. Bei der Deflagration sind dementsprechend die Reaktionsgeschwindigkeit und der auftretende Druck erheblich niedriger als bei einer Detonation.

Zum Auftreten einer Deflagration gelten folgende Voraussetzungen: Die Werte für die untere bzw. obere Zündgrenze in Luft betragen für Wasserstoff 4 und 75,6 Volumen-Prozent und für Methan 5 und 15 Volumen-Prozent. Bei einem Druck von 0,1 MPa beträgt die minimale Zündenergie für stöchiometrische Wasserstoff-Luftgemische weniger als 0,02 mJ und für Methan-Luftgemische weniger als 0,3 mJ. Für Detonationen gelten erheblich restriktivere Randbedingungen. Insbesondere liegt die minimale Zündenergie erheblich höher. Für ein stöchiometrisches Wasserstoff-Luftgemisch beträgt die minimale Zündenergie ca. 4 kJ, was etwa der Menge von 1 g Sprengstoff entspricht. Für nichtstöchiometrische Verhältnisse liegt der Wert noch erheblich höher, z. B. bei 30 kJ für 17 % und bei 140 kJ bei 46 % H_2 -Konzentration (Guiaro et al. 1989).

77.3 Sachlage am Standort

Gasförmiger Sauerstoff liegt aus der eingeschlossenen Grubenluft vor, so dass bei Bildung von Wasserstoffgas prinzipiell ein zündfähiges Gasgemisch möglich ist. Da der Sauerstoff im Endlager nach dessen Verschluss schnell durch aerobe Korrosionsprozesse aufgezehrt wird, ist das Auftreten zündfähiger Gasgemische aber eher unwahrscheinlich.

Wegen der niedrigen Zündenergien für die Auslösung einer deflagrativen Wasserstoffverbrennung sind auch in der Nachverschlussphase Zündvorgänge denkbar. Dagegen sind keine Prozesse denkbar, bei denen die erforderlichen Energien für eine freie Detonation entstehen. Weiterhin dient der als Versatz eingebrachte Salzgrus als Flammensperre und verhindert die Fortpflanzung von eventuell entstehenden Flammenfronten (Barnert & Wetzler 1998), so dass selbst im ungünstigen Fall, der Bildung von zündfähigen Gasgemischen, nur von deflagrativen Verbrennungen auszugehen ist.

Für eine deflagrative Wasserstoffverbrennung wurde sowohl in Experimenten, als auch in theoretischen Berechnungen eine maximale relative Druckerhöhung um weniger als eine Größenordnung festgestellt (Landold-Börnstein 1972, U.S. DOE 1996). Sowohl theoretische Überlegungen (U.S. DOE 1996, Becker et al. 2009), als auch experimentelle Versuche mit Sprengungen (CTR 1936) zeigen, dass durch die zu erwartenden Druckerhöhungen wegen ihrer beschränkten Größe, bzw. Einwirkungsdauer, keine Schädigungen des Gebirges, des Salzbetonversatzes oder der Streckenabdichtungen zu erwarten sind.

77.4 Standortspezifische Auswirkungen

Aus allen bisher durchgeführten Betrachtungen ergibt sich, dass bei den potenziell ablaufenden explosionsbedingten Druckerhöhungen wegen ihrer beschränkten Größe und Einwirkungsdauer keine Schädigungen des Wirtsgesteins oder der Abdichtungen zu erwarten sind.

77.5 Zeitliche Beschränkung

Prinzipiell keine, aber ein Erreichen der Zündbedingungen ist durch den Verbrauch des Sauerstoffs durch aerobe Korrosionsprozesse nur zu frühen Zeiträumen wahrscheinlich.

77.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

77.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

77.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

77.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Entsprechend der standortspezifischen Auswirkungen sind auf Grund der beschränkten Größe und Einwirkungsdauer potenzieller Druckerhöhungen keine Auswirkungen zu betrachten.

Wirkung in den Teilsystemen: Keine, da der Prozess als nicht zu betrachten klassifiziert wird.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Keine, da der Prozess als nicht zu betrachten klassifiziert wird.

77.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

77.11 Offene Fragen

Keine.

77.12 Literaturquellen

Barnert, E. & Wetzler, H. (1998): Die Löschwirkung von Salzgrus als Flammensperre. - Berichte des Forschungszentrums Jülich Jül-3494; Jülich.

Becker, D.-A., Buhmann, D., Mönig, J., Noseck, U., Rübel, A., Spiessl, S. (2009): Endlager Morsleben, Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS. - Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage P 278.

CTR (1936): Bericht über die Versuche im Kalibergwerk Riedel bei Hänigsen zur Festlegung von Richtlinien für die Sprengstoff- und Pulverlagerung in Kalibergwerken, Chemisch-Technische Reichsanstalt Berlin.

Guirao, C.M., Knytausas, R., Lee, J.H. (1989): A Summary of Hydrogen-Air detonation Experiments. - Sandia National Laboratories, NUREG/CR-4961; Washington.

Landold-Börnstein (1972): Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. 4.Band: Technik. 4.Teil: Wärmetechnik. Bestandteil b: Thermodynamische Eigenschaften von Gemischen, Verbrennung, Wärmeübertragung. – Springer-Verlag; Berlin.

U.S. DOE (1996): Title 40 CFR 191: Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant. Appendix PCS. - U.S. Department of Energy; Carlsbad, New Mexico.

Weiterführende Literatur:

Müller-Lyda, I. (ed. (1997)): Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-129; Braunschweig.

Schneider, L., Bertram, W., Herzog, C., Krause, H., Sachse, C. (1997): Auswertung von russischen Experimenten zum Nachweis der Stabilität von Salzdomen nach Freisetzung extremer Energiemengen im Steinsalzmassiv. - Stoller Ingenieurtechnik GmbH, unveröffentl. Abschlußbericht, SIG- 04/97: 176 S., 42 B., 41 Tab., 6 Anl.; Dresden.

78 Strahlungsinduzierte Aktivierung (2.1.13.01)

78.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als strahlungsinduzierte Aktivierung wird die Bildung von radioaktiven Isotopen durch Kernreaktionen nach Absorption von Neutronen bezeichnet.

78.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Treffen Neutronen auf Atomkerne, so können sie in Abhängigkeit der Energie der Neutronen eine Reihe von verschiedenen Kernreaktionen auslösen. Um die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Reaktionen quantifizieren zu können, führt man als Maß den Wirkungsquerschnitt ein. Dieser Wirkungsquerschnitt hat die Dimension einer fiktiven Fläche, deren Größe durch die experimentell beobachtete Häufigkeit des Auftretens einer Kernreaktion bestimmt ist (Heinicke et al. 1998). Wirkungsquerschnitte werden im Hinblick auf bestimmte Kernreaktionen angegeben. Man spricht dann von Einfang-, Spalt-, elastischen und inelastischen Streuquerschnitten.

78.3 Sachlage am Standort

Durch die Neutronenstrahlung aus den radioaktiven Abfällen findet eine strahlungsinduzierte Aktivierung der Abfallmatrix und des Behältermaterials statt. Die CASTOR- und POLLUX-Behälter sind so ausgelegt, dass darüber hinaus keine strahlungsinduzierte Aktivierung der Umgebung für die Streckenlagerung betrachtet werden muss. Bei den nicht abschirmenden Endlagerbehältern bei der Bohrlochlagerung kann es durch die emittierte Neutronenstrahlung im Wirtsgestein bzw. im Versatz des Bohrlochs in einer Umgebung von einigen Metern durch strahlungsinduzierte Aktivierung von stabilen Isotopen des Wirtsgesteins zur Bildung sekundärer gamma-Quanten und zu Elementumwandlungen kommen. Die relative Neutronendosis nimmt infolge der größeren Eindringtiefe im Steinsalz mit wachsendem Abstand von der Behälterwand langsamer ab, als die jeweilige gamma-Dosis der Abfälle.

78.4 Standortspezifische Auswirkungen

Das Ausmaß des Neutronenaktivierungsprozesses im Endlager ist noch nicht berechnet worden. Der Prozess wird aber vermutlich nur eine untergeordnete Rolle spielen. Im Vergleich zu den Inventaren in den eingelagerten Abfällen ist die Aktivierung qualitativ unbedeutend. Der Absolutwert der sekundären gamma-Dosis, die durch strahlungsinduzierte Aktivierung im Wirtsgestein erzeugt wird, liegt um mehrere Größenordnungen unter der gamma-Dosis der Abfälle (Gies et al. 1993).

78.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

78.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

78.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

78.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

78.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Auf Grund der eingelagerten radioaktiven Abfälle ist eine strahlungsinduzierte Aktivierung in deren unmittelbaren Umgebung (Nahfeld, Wirtsgestein) zu betrachten.

Wirkung in den Teilsystemen: Ist im Nahfeld und im Wirtsgestein zu betrachten (s.o.)

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Obwohl das FEP Wirtsgestein als beeinflusstes FEP aufgeführt ist, wird das FEP hinsichtlich der Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren als "nicht zutreffend" klassifiziert, da die Beeinträchtigung sehr gering ist und keine negativen Auswirkungen auf die Integrität des Wirtsgesteins hat.

78.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Radioaktiver Zerfall

Begründungen:

Radioaktiver Zerfall: Durch Neutronenstrahlung der eingelagerten Abfälle werden Materialien in der Nähe der Abfälle durch Kernreaktionen beeinflusst.

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Bohrlochverrohrung

Wirtsgestein

Begründungen:

Inventar: Metalle, Inventar: Organika, Abfallmatrix, Behälter, Wirtsgestein, Versatz, Bohrlochverrohrung: Die vorhandenen "Inventare" bestimmen das mögliche Ausmaß einer Aktivierung. Behälter und Abfallmatrix beeinflussen durch ihre Abschirmung.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Radionuklide

Inventar: Metalle

Inventar: Organika

Abfallmatrix

Versatz

Bohrlochverrohrung

Wirtsgestein

Begründungen:

Inventar: Radionuklide: Aktivierungsprozesse führen zu einer Veränderung des Radionuklidinventars.

Inventar: Metalle, Inventar: Organika, Abfallmatrix, Wirtsgestein, Versatz, Bohrlochverrohrung: Bei den nicht selbstabschirmenden Endlagerbehältern kann die emittierte Neutronenstrahlung im Wirtsgestein bzw. im Versatz des Bohrlochs in einer Umgebung von einigen Metern durch strahlungsinduzierte Aktivierung von stabilen Elementen zur Bildung sekundärer gamma-Quanten und zu Elementumwandlungen kommen. Es können auch die Inventare geändert werden.

Bemerkungen:

Behälter: Einfluss auf die Behälter und deren Eigenschaften ist vernachlässigbar.

78.11 Offene Fragen

- Neutroneneinfangquerschnitte von Cl-
- Ausmaß der Aktivierung durch Neutronen in den metallischen Bestandteilen der Brennelementen bei den im Endlager herrschenden Neutronendosen

78.12 Literaturquellen

Gies, H., Hild, W., Kühle, T., Mönig, J. (1993): Strahleneffekte im Steinsalz - Statusbericht. - GSF-Report 9/93; München.

Heinicke, W., Krug, H., Thomas, W., Weber, W. Gmal, B., Moser, E.F. (1998): Handbuch zur Kritikalität. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Garching.

Weiterführende Literatur:

Adloff, J.-P., Guillaumont, R. (1993): Fundamentals of Radiochemistry. - CRC Press, Inc; Boca Raton, USA.

79 Materialversprödung durch Strahlung (2.1.13.02)

79.1 Definition/Kurzbeschreibung

Durch ionisierende Strahlung werden Materialgefüge beeinträchtigt, so dass es in der Folge zu einer Versprödung der Materialien kommen kann.

79.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Materialversprödungen entstehen durch Änderungen der chemischen Bindung zwischen den Atomen eines Stoffes, durch Verlagerung der Atome durch Kernstöße im Atomverband oder durch Kernreaktionen mit Umwandlungen.

Der Umfang der Schädigung des Materials ist von der Intensität und der Strahlungsart abhängig (Vogt & Schultz 2004). Die Intensität der Strahlung wird vor allem von den kurzlebigen Radionukliden bestimmt.

In einem Endlager sind hauptsächlich die Metalle der Behälter und die Glasmatrixen der eingelagerten Abfälle bei der Bewertung einer Materialversprödung durch Strahlung zu betrachten.

79.3 Sachlage am Standort

Für die HAW-Glasprodukte liegt ein hoher Wissenstand hinsichtlich ihres Verhaltens unter Bestrahlung vor (Weber et al. 1997, Lutze 1993). Als Ergebnis zeigen mögliche Strahlenschäden in einer Glasmatrix wenig Relevanz bei der Bewertung der Freisetzung von Radionukliden. Ermittelte Korrosionsraten sind nahezu unabhängig vom Anteil radioaktiver Stoffe. Eine Freisetzung ist durch Strahlenschäden nicht allein möglich, entscheidend sind der Kontakt mit Lösungen und deren geochemisches Milieu (Kienzler & Loida 2001).

Für die Metalle der Behälter spielt die Versprödung durch Strahlungseffekte eine untergeordnete Rolle. Hier dominieren elektrochemische Effekte (siehe FEP Metallkorrosion) und die Versprödung durch Wasserstoff (siehe FEP Materialversprödung durch Wasserstoff).

79.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Materialversprödung durch Strahlung hat eine sehr geringe Relevanz und kann gegenüber anderen Prozessen, die auf die Metalle der Behälter und die Matrices einwirken, als nachrangig eingeordnet werden.

79.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

79.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

79.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

79.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

79.9 Begründungen

Obwohl es ein wahrscheinlicher Prozess ist, ist durch Untersuchungen nachgewiesen worden, dass die Auswirkung auf die Materialien im Endlagersystem im Vergleich zu anderen Prozessen (Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoff) nicht relevant sind. Das FEP wird daher in keinem Teilsystem betrachtet.

79.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

79.11 Offene Fragen

Keine.

79.12 Literaturquellen

Kienzler, B., Loida, A. (2001): Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten - Charakterisierung und Bewertung - Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte. - Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651, Stellungnahme 9: Strahlenbeständigkeit von HAW-Glasprodukten; Karlsruhe.

Lutze, W. (1993): Verglasung von toxischen, insbesondere von hochradioaktiven Abfällen. - Forschungszentrum Karlsruhe, KfK 5267; Karlsruhe.

Vogt, H.-G., Schultz, H. (2004): Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. - 3. Auflage: 585 S., 158 Abb., 56 Tab., 76 Diagr., Hanser; München.

Weber, W.J., Ewing, R.C., Angell, CA., Arnold, G.W., Cormack, A.N., Delaye, J.M., Griscom, D.L., Hobbs, L.W., Navrotsky, A., Price, D.L., Stoneham, A.M., Weinberg, M.C. (1997): Radiation effects in glasses used for immobilization of high-level waste and plutonium deposition. - Journal of Materials Research 12(8): 1946-1978.

80 Radiolyse (2.1.13.03)

80.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Radiolyse versteht man die Veränderung chemischer Verbindungen durch die Einwirkung ionisierender Strahlung. Mögliche Veränderungen sind z. B. eine Dissoziation von Molekülen oder die Bildung von Radikalen.

80.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Radiolyse kann in Festphasen, in Flüssigkeiten und in der Gasphase auftreten. Man unterscheidet bei der durch radioaktive Abfälle verursachten Radiolyse zwischen der inneren Radiolyse im Abfallgebinde und der Radiolyse außerhalb der Abfallgebinde (äußere Radiolyse). Die innere Radiolyse ist generell vernachlässigbar gegenüber den Auswirkungen der äußeren Radiolyse (Rodwell et al. 1999). Das Ausmaß der äußeren Radiolyse ist abhängig von der Abschirmung der ionisierenden Strahlung durch die Abfallmatrix und die Abfallbehälter.

In einem Endlager in Steinsalz kommen grundsätzlich drei Prozesse in Frage:

1. Radiolyse des Steinsalzes:

Die Energie der gamma-Strahlung wird im Salz absorbiert und dabei überwiegend in Wärme umgewandelt. Nur ein geringer Anteil der eingestrahnten gamma-Energie führt über einen komplexen Mechanismus letztlich zur Bildung der Radiolyseprodukte Na-Kolloide und Chlorgasbläschen, die in voneinander getrennten Bereichen im NaCl-Kristall dispers verteilt vorliegen, so dass diese Strahlendefekte gegen unmittelbare Rekombination bestehen bleiben. Dieser Vorgang ist mit der Speicherung von Energie verbunden und wird als Strahlenschädenbildung im Steinsalz bezeichnet. Der Anteil der gespeicherten Energie an der insgesamt eingestrahnten gamma-Energie wird als Effizienz der Energiespeicherung ausgedrückt.

Strahlenschäden manifestieren sich im Kristallgitter des Halits, sobald eine Mindestdosis von einigen Megagray (1 MGy = 1 E+6 J/kg) eingestrahlt worden ist. Diese Prozesse sind experimentell untersucht worden (siehe Zusammenfassungen in Gies et al. (1993) und Mönig (2002) sowie insbesondere die neueren Arbeiten an der Universität

Groningen, z. B. Turkin et al. (2007)). Bei gleichbleibender Dosisleistung sind die Strahlenschäden über einen weiten Dosisbereich proportional zur gamma-Dosis und somit die Effizienz der Energiespeicherung in etwa konstant. Zur Beschreibung der qualitativen Abhängigkeit der Strahlenschädenbildung von den Parametern Dosis, Dosisleistung und Temperatur existieren einfache Modelle. Danach ist die Strahlenschädigung mit den Dosisleistungen über eine Wurzelfunktion verknüpft. Höhere Dosisleistungen führen aufgrund der Rekombination der Defektzentren zu geringeren Strahlenschäden bezogen auf die Dosis als geringere Dosisleistungen. Allerdings erklären diese Modelle nicht einige der experimentell beobachtbaren Phänomene. Außerdem ist die experimentelle Datenbasis zur Überprüfung von Modellvorstellungen oder zur Anpassung der Modellparameter recht begrenzt (RSK 2006).

Bei einer langsamen Rückreaktion von kolloidalem Natrium und Chlorgas wird Wärme freigesetzt. Diese ist im Vergleich zur absorbierten gamma-Energie im umgebenden Gebirge und insbesondere zum Wärmeeintrag in das Gebirge aus der Wärmeleistung der Abfallkokillen verschwindend gering. Daher ist bei einer langsamen Rückreaktion praktisch mit keinerlei Auswirkungen zu rechnen. Eine spontane, schlagartige Rekombination von Radiolyseprodukten unter Freisetzung der gespeicherten Energie kann nicht vollständig ausgeschlossen werden. Je nach Menge der Radiolyseprodukte könnte es dabei zu lokalen Temperaturerhöhungen sowie zu Erhöhungen der Gebirgsdrücke kommen. Damit wäre eine lokale Beeinträchtigung der Barrierenintegrität im Bereich von wenigen 10 cm um unabgeschirmte, dünnwandige Abfallbehälter herum möglich. Wegen der abschirmenden Wirkung des Gebirges blieben solche Rückreaktionen aber auf das unmittelbare Umfeld der Abfallbehälter begrenzt. Die Integrität der Barriere Salzgestein insgesamt würde dadurch nicht beeinflusst (Gies et al. 1993, Möning 2002, RSK 2006).

Nennenswerte Mengen von Gasen, z. B. Chlorgas, werden aus dem Kristallverband nicht freigesetzt (Müller-Lyda 1997). Ist Wasser in der Nähe der Radiolyseprodukte verfügbar, reagiert das metallische Natrium der Na-Kolloide unter Bildung von Wasserstoff (Gies et al. 1993, Schulze 2002), während das Chlorgas zu Hypochlorit umgesetzt wird. Diese Reaktionen kann man auch im Labor heranziehen, um das Ausmaß der Strahlenschädenbildung im Steinsalz experimentell zu bestimmen.

2. Radiolyse von Lösungen:

Die Radiolyse von wässrigen Lösungen führt zur Zersetzung des Wassers und zur Bildung von molekularen Bestrahlungsprodukten, die gasförmig oder gelöst vorliegen. Der genaue Mechanismus und die Ausbeute der verschiedenen Bestrahlungsprodukte hängen von der Art der ionisierenden Strahlung, der Dosisleistung und den Lösungsinhaltsstoffen ab. Durch die Radiolyse wird lokal das geochemische Milieu der wässrigen Lösungen verändert; dieser Effekt ist besonders bei der alpha-Radiolyse ausgeprägt, bei der sich oxidierende Bedingungen einstellen.

3. Radiolyse von Kohlenwasserstoffen:

Die Radiolyse der gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffe, die zum Stoffbestand von Salzgesteinen gehören (siehe FEP Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein), führt zunächst zu Bindungsbrüchen von C-C-Bindungen in den organischen Molekülen und zur Bildung reaktiver organischer Radikale in der fluiden Phase. Je nach Gegenwart weiterer Reaktionspartner, wie z. B. Wasser, entstehen im Ergebnis komplexer Reaktionsabläufe molekulare Produkte wie z. B. kürzerkettige Kohlenwasserstoffe, kurzkettige organische Säuren und CO₂.

80.3 Sachlage am Standort

Solange der Abfall durch den Behälter physikalisch von dem umliegenden Endlagergestein bzw. vorhandener Lösung getrennt ist, sind nur die Auswirkungen der Radiolyse durch gamma- und Neutronenstrahlung zu betrachten. Bei den selbstabschirmenden Endlagerbehältern (z. B. POLLUX-Behälter) ist die gamma- und Neutronen-Dosisleistung so gering, dass es nicht zu einer nennenswerten Radiolyse kommen kann.

Bei nicht selbstabschirmenden Endlagerbehältern wie den HAW-Kokillen liegt die Oberflächendosisleistung der Abfallgebinde zum Zeitpunkt der Einlagerung in der Größenordnung von wenigen 100 Gy/h (RSK 2006), die im Wesentlichen von relativ kurzlebigen Aktivierungs- und Spaltprodukten hervorgerufen wird. Ohne weitere Abschirmung würde daraus eine gamma-Dosis an der Gesteinsoberfläche von etwa 100 MGy resultieren, von denen der überwiegende Teil in den ersten 200 Jahren eingestrahlt würde. Die Verrohrung der Bohrlöcher führt jedoch zu einer nennenswerten Verringerung der gamma-Dosis an der Salzgesteinsoberfläche, woran auch der in die Verroh-

rung eingebrachte Versatz einen Anteil hat. Der Umfang der Abschwächung der gamma-Dosisleistung hängt von den Abmessungen der Verrohrung, der Wandstärke und den verwendeten Materialien für die Bohrlochwandung und den in die Verrohrung eingebrachten Versatz ab. Es wird für die Variante C erwartet, dass durch die Bohrlochverrohrung und den in den Ringspalt zum Abfallbehälter eingebrachten Quarzsand die gamma-Dosis an der Gesteinsoberfläche erheblich verringert wird. Entsprechende Nachweise sind noch zu erbringen. Die Absorption von Neutronen im Steinsalz führt zur Bildung von Sekundär-gamma-Quanten. Dieser Prozess ist nur bei nicht selbstabschirmenden Abfallbehältern von Bedeutung, trägt aber nur maximal zu 10 % zur Gesamtmenge an gamma-Quanten im Steinsalz bei (Gies et al. 1993).

Bei Anwesenheit von Lösungen ist vor allem die Radiolyse von Wasser relevant. Im Falle eines direkten Kontaktes zwischen Lösungen und Abfall erfolgt die Radiolyse der Lösungen zunächst im Wesentlichen durch gamma-Strahlung. Nach etwa 500 Jahren wird wegen des Zerfalls wichtiger gamma- und beta-Strahler, die durch alpha-Strahlung des Abfalls verursachte Radiolyse (Grambow et al. 1996) dominieren.

Das Ausmaß der radiolytischen Zersetzung von Kohlenwasserstoffen hängt, wegen der abschirmenden Wirkung des Salzgesteins, von der Menge der in unmittelbarer Nähe der Abfälle von der ionisierenden Strahlung durch die Strahlung beeinflussten Kohlenwasserstoffe ab.

80.4 Standortspezifische Auswirkungen

In allen betrachteten Endlagerkonzepten für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle ist eine Abschirmung gegenüber der von den Abfällen ausgehenden ionisierenden Strahlung wirksam (selbstabschirmende Endlagerbehälter in den Endlagervarianten B1 und B2 oder Verrohrung in der Variante C). Deshalb kann die erforderliche Gammadosis zur Manifestation von Strahlenschäden im Steinsalz, wenn überhaupt, nur in einem sehr engen Bereich von wenigen Zentimetern in radialer Richtung um die Verrohrung eines Bohrlochs herum auftreten. Wegen der geringen Mengen an Radiolyseprodukten sind die Auswirkungen der Radiolyse des Steinsalzes und von Kohlenwasserstoffen zu vernachlässigen.

Durch Radiolyse von Lösungen können unter anderem gasförmige Verbindungen entstehen (Radiolysegasbildung). Nach Röhlig et al. (1999) ist die Gasbildung infolge Ra-

diolyse um zwei bis drei Größenordnungen kleiner als die durch Korrosion und mikrobielle Zersetzung verursachte Gasbildung. Für die Bohrlochlagerung ist die Radiolyse der Feuchte im Verfüllmaterial (Quarzsand mit ca. 0,2 Gew.- % Feuchte) zu berücksichtigen. Da ansonsten die am Standort endgelagerten hochradioaktiven Abfälle keine nennenswerten Mengen an Wasser enthalten, werden bei den anderen Endlagervarianten Radiolyse-Reaktionen von Wasser erst wirksam, wenn es zu einem Zutritt von Lösungen zu den Abfällen gekommen ist.

80.5 Zeitliche Beschränkung

Die Wirksamkeit der Radiolyseprozesse nimmt mit der Strahlungsintensität ab, mehr als 90 % der gamma-Strahlungsenergie werden innerhalb der ersten 100 Jahre frei. Die radiolytische Zersetzung von Wasser durch alpha- und beta-Strahler ist erst möglich, wenn die Abfallmatrix in direktem Kontakt mit wässrigen Lösungen steht. Wegen der langen Halbwertszeiten der entsprechenden Radionuklide gibt es für diese Prozesse keine zeitliche Beschränkung.

80.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

80.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

80.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

80.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung in den Teilsystemen: Auf Grund der eingelagerten radioaktiven Abfälle ist die Radiolyse in deren unmittelbaren Umgebung (Nahfeld, Wirtsgestein) zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Obwohl das FEP Wirtsgestein als beeinflusstes FEP aufgeführt ist, wird das FEP hinsichtlich der Einwirkung auf die Funktion der Initial-Barrieren als "nicht zutreffend" klassifiziert, da die Einwirkung des FEP sehr gering ist und keine negativen Auswirkungen auf die Integrität des Wirtsgesteins hat.

80.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Radioaktiver Zerfall

Begründungen:

Radioaktiver Zerfall: Die ionisierende Strahlung aus den Abfällen führt zur Radiolyse in ihrer unmittelbaren Umgebung.

Beeinflussende FEP:

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Bohrlochverrohrung

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Wärmeproduktion

Wirtsgestein

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Begründungen:

Abfallmatrix: Je nach Matrix kann die Abschirmung unterschiedlich sein.

Bohrlochverrohrung, Behälter-FEP: Wandstärke und Material der Behälter/Verrohrung sind wichtige Kriterien für das Ausmaß der Radiolyse.

Versatz: Zusammensetzung und Eigenschaften des Versatzes (Feuchte) bestimmen das Ausmaß der Radiolyse.

Lösungen im Grubenbau: Die Anwesenheit von Wasser ist eine notwendige Voraussetzung für die Radiolyse von Wasser.

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein, Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Die Menge an Fluiden und KW in unmittelbarer Umgebung der Abfälle bestimmt das Ausmaß der Radiolyse dieser Stoffe.

Wirtsgestein: Die Eigenschaften des Steinsalzes, das in unmittelbarer Umgebung der Abfälle ansteht, bestimmt das Ausmaß seiner Radiolyse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Der genaue Ablauf der Radiolyse von wässrigen Lösungen und Art und Menge der dabei entstehenden Bestrahlungsprodukte hängen von den Lösungsinhaltsstoffen und damit vom geochemischen Milieu ab.

Wärmeproduktion: Die Rückreaktionen der Radiolyse sind von der Temperatur abhängig.

Resultierende FEP: keine

Bemerkungen:

Wärmeproduktion: Bei der Absorption von ionisierender Strahlung in Materie entsteht immer Wärme; allerdings ist dieser Effekt relativ gering. Bei der Rekombination von durch Radiolyse erzeugten Strahlendefekten im Steinsalz kann mehr Wärme freigesetzt werden. Diese kann aber gegenüber der Wärme aus den Zerfallsprozessen der Radionuklide in den Abfällen vernachlässigt werden.

Beeinflusste FEP:

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Bohrlochverrohrung

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Zersetzung von Organika

Gasbildung

Wirtsgestein

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Begründungen:

Abfallmatrix, Versatz, Lösungen im Grubenbau, Wirtsgestein, Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein, Fluidvorkommen im Wirtsgestein (Mikroeinschlüsse), Bohrlochverrohrung, Behälter-FEP: Die in unmittelbarer Umgebung der Abfälle vorliegenden Lösungen und Feststoffe können von Radiolyse betroffen sein.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Radiolyse von wässrigen Lösungen führt durch die Zersetzung von Wasser und die Bildung von molekularen Bestrahlungsprodukten im Wasser zu einer Veränderung des geochemischen Milieus.

Korrosion zementhaltiger Materialien: Da Wasser eine Komponente des Zementes ist, kann Radiolyse eine Rolle spielen.

Zersetzung von Organika: KW können radiolytisch zersetzt werden.

Gasbildung: Bei Radiolysereaktionen entsteht in der Regel Gas.

Komplexbildung: Die radiolytische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen führt zur Bildung von kurzkettigen organischen Säuren, die als Komplexbildner agieren können.

80.11 Offene Fragen

Belastbare Zahlenwerte für die Effizienz der Energiespeicherung bzw. den Schwellenwert für mögliche explosionsartige Rückreaktionen bei den Verhältnissen im Endlager sind noch nicht entwickelt. Ferner ist nicht geklärt, ob es zulässig ist, den bei sehr hohen Dosisleistungen ermittelten Schwellenwert auf die um mehrere Größenordnungen niedrigeren endlagerrelevanten Dosisleistungen zu übertragen.

80.12 Literaturquellen

Gies, H., Hild, W., Kühle, T., Mönig, J. (1993): Strahleneffekte im Steinsalz - Statusbericht. - GSF-Report 9/93; München.

Grambow, B., Loida, A., Smailos, E. (1996): Langzeitstabilität von Abfallgebinden und abgebranntem Kernbrennstoff gegenüber Korrosion unter Endlagerbedingungen. Direkte Endlagerung; Sammlung der Vorträge anlässlich der Abschlußveranstaltung am 7. und 8. Dezember 1995 in Karlsruhe. - FZK, Technik u. Umwelt, PTE, Wiss. Ber., FZKA-PTE Nr. 2: 213-267, 13 Abb.; Karlsruhe.

Mönig, J. (2002): Literaturstudie über die Fortentwicklung des Kenntnisstandes seit 1997 zur Bildung von Strahlenschäden in Alkalihalogeniden. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht GRS-A-3058; Braunschweig.

Müller-Lyda, I (1997): Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht GRS-129; Braunschweig.

Rodwell, W.R., Harris, A.W., Horsemann, S.T., Lalieux, P., Müller, W., Ortiz Amaya, L., Pruess, K. (1999): Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste. A joint EC/NEA Status Report. -European Commission & Nuclear Energy Agency, EUR 19122 EN; Brüssel.

Röhlig, K.-J., Baltés, B., Becker, A., Bogorinsky, P., Fischer, H., Fischer-Appelt, K., Javeri, V., Lambers, I., Martens, K.-H., Morlock, G., Pörtl, P. (1999): Sicherheit in der Nachbetriebsphase von Endlagern für radioaktive Abfälle, Abschlußbericht. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2656: 155 S., 61 Abb., 7 Tab.; Köln.

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) (2006): RSK-Stellungnahme: Strahlenschäden im Steinsalz (391. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Schulze, O. (2002): Auswirkung der Gasentwicklung auf die Integrität geringdurchlässiger Barrieregesteine. - BGR, unveröffentl. Ber.: 142 S., 27 Abb., 4 Tab., Anh. AG; Hannover.

Turkin, A.A., Sugonyako, A.V., Vainshtein, D.I., den Hartog, H. (2006): Radiolysis of NaCl at high and low temperatures: development of size distribution of bubbles and colloids. - Journal of Physics-Condensed Matter 18 (24): 5655-5668.

Weiterführende Literatur:

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) (2005): RSK-Stellungnahme: Gase im Endlager (379. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Rübel A., Noseck, U., Müller-Lyda, I., Kröhn, K.-P., Storck, R. (2004): Konzeptioneller Umgang mit Gasen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-205; Braunschweig.

Rübel A., Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz. - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

81 Kritikalität (2.1.14.01)

81.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Kritikalität wird ein Zustand verstanden, bei dem spaltbares Material in einer solchen Anordnung vorliegt, dass eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion stattfindet (Kernspaltung), d. h., die Neutronenproduktionsrate ist gleich oder größer als die Neutronenverlustrate. Dieser Zustand könnte eintreten, wenn eine Mindestmenge spaltbarer Stoffe in einer geeigneten räumlichen Anordnung vorliegt und andere Einflussgrößen (z. B. das richtige Moderationsverhältnis) gegeben sind.

81.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Eine Kettenreaktion kann nur stattfinden, wenn Wasser als Neutronenmoderator vorhanden ist. Bei einer Kettenreaktion in einem Endlager erhöht sich aber die Temperatur in der Regel so stark, dass das umgebende Wasser – das als Neutronen-Moderator notwendig ist – verdampft, wodurch die Reaktion wieder zum Stillstand kommt. Durch die Reaktion werden neue Radionuklide erzeugt, die bei der Bilanzierung des radioaktiven Inventars zu berücksichtigen sind. Auch die Wärmeproduktion durch den Prozess sowie mechanische Auswirkungen (Ausdehnung des Fluids usw.) ist bei Erreichen einer kritischen Ansammlung zu berücksichtigen.

81.3 Sachlage am Standort

Durch eine geeignete Beladung der Endlagerbehälter können kritische Konstellationen intakter Brennstäbe ausgeschlossen werden. Theoretisch möglich wäre eine kritische Anreicherung durch Auflösung des Brennstoffs und anschließender Ausfällung des Urans als neue Mineralphase. Für die damit einhergehende Volumenvergrößerung dürfte jedoch aufgrund der Gebirgskonvergenz kein Raum bestehen (Gmal et al. 2004).

Eine z. B. durch gebirgsmechanische Prozesse sekundär gebildete kritische Anordnung wird ebenfalls ausgeschlossen (Kienzler et al. 2003).

81.4 Standortspezifische Auswirkungen

Am Standort werden die unter "Allgemeine Informationen" genannten generellen Auswirkungen einer Kettenreaktion ausgeschlossen.

81.5 Zeitliche Beschränkung

Da Pu-239 zu U-235 zerfällt, gilt dieses FEP für sehr lange Zeiträume. Nach etwa 100.000 Jahren ist Pu-239 (Halbwertszeit 24.000 Jahre) zu einem erheblichen Teil zerfallen. Nach dem Zerfall des Pu-239 kann sich das Isotopenverhältnis von U-238 zu U-235 nicht mehr gravierend ändern, so dass danach die Kritikalität nicht mehr erhöht werden kann. Da sich die Uranisotope chemisch sehr ähnlich verhalten, entfällt nach dieser Zeit weitgehend die Möglichkeit der Bildung einer auf geochemischen Prozessen beruhenden Aufkonzentrierung von Kernbrennstoff.

81.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

81.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

81.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

81.9 Begründungen

Eine Kritikalität kann auf Grund des Endlagerkonzepts zunächst ausgeschlossen werden. Durch eine Vielzahl von Untersuchungen sind die Prozesse, die zu späteren Zeiten Spaltstoffansammlungen bilden könnten, gut verstanden. Auf Grund der Ergebnisse dieser Untersuchungen kann auch für späte Zeiträume Kritikalität ausgeschlossen werden.

81.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

81.11 Offene Fragen

Keine.

81.12 Literaturquellen

BfS (Bundesamt für Strahlenschutz, Hrsg.) (2005): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamts für Strahlenschutz; Salzgitter.

Gmal, B., Hesse, U. Hummelsheim, K., Kilger, R., Krzykasc-Hausmann, B., Moser, E.F. (2004): Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3240; München.

Kienzler, B., Loida, A., Maschek, W., Rineiski, A. (2003): Is criticality a matter of concern for Gorleben? - 2003 Internat. High Level Radioactive Waste Management Conf.; Las Vegas, Nevada.

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission): RSK-Stellungnahme zum Synthesebericht des BfS "Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle -Wirtsgesteine im Vergleich" (395. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

82 Auflockerungszone (2.2.01.01)

82.1 Definition/Kurzbeschreibung

Eine Auflockerungszone (ALZ) ist ein konturnah begrenzter und geschädigter Bereich des den Hohlraum umgebenden Gebirges, wobei dessen Schädigung, d. h. mit Rissbildung verbundene Dilatanz, und die daraus resultierende Permeabilität durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes und die damit verbundene Überschreitung der Dilatanzgrenze entstanden ist.

82.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Durch die Auffahrung der Hohlräume des Grubengebäudes wird der Primärspannungszustand im Salzgebirge verändert. Die Radialspannungen um den Hohlraum reduzieren sich an der Kontur auf Null, gleichzeitig steigen die Axial- und insbesondere die Tangentialspannungen im Gebirge an und erhöhen die Spannungsdifferenz. Abhängig von der Temperatur und der Mineralogie des Salzgebirges sowie durch Spannungsüberlagerungen aus benachbarten Hohlräumen kann sich das Salz über das reine Kriechen hinaus deformieren und an der Kontur bei Überschreiten der Dilatanzgrenze durch Rissbildung eine Auflockerungszone ausbilden. Die Reichweite dieses Prozesses hängt neben anderen Parametern (z. B. Streckengeometrie, Art der Auffahrung) vor allem von der Standzeit des Hohlraumes ab, wobei die Entwicklung degressiv verläuft. Die gebildeten Risse können netzartig miteinander verbunden sein. Aufgrund der Ausrichtung der Tangentialspannung kann es bei starker Schädigung im Nahbereich der Kontur zu konturparallelen Klüften mit Abschalungen des Gebirges kommen.

Durch die Sekundärpermeabilität der Auflockerungszone entstehen potentielle Fließpfade im Grubengebäude. Sie sind für den Langzeitsicherheitsnachweis von besonderer Bedeutung. In einem Endlager werden Grubenräume gebirgsmechanisch so dimensioniert, dass die zwischen den Hohlräumen liegenden Pfeiler und Schweben nicht derart belastet werden, dass sie risshaft deformieren. Damit kann die Auflockerungszone im Salzgestein auf den Nahbereich um die Hohlräume herum begrenzt werden.

Für die Bestimmung der Reichweite der hydraulisch relevanten Auflockerungszone um Hohlräume herum wird ein Instrumentarium verschiedener geotechnischer Messverfah-

ren eingesetzt, z. B. Permeabilitätsmessungen, Geoelektrik, Hydrofrac und Durchschallung (z. B. Wieczorek & Schwarzianek 2001, Popp et al. 2007).

Durch die Konvergenz und das damit verbundene Auflaufen des Gebirges auf den Versatz bzw. auf Schacht- und Streckenverschlüsse können sich die Risse in der Auflockerungszone formschlüssig schließen, wie in Analoguntersuchungen, z. B. am Dammjoch Asse, nachgewiesen wurde (Wieczorek & Schwarzianek 2001). Aufgrund von Rauigkeiten der Rissoberflächen können zunächst noch Restrisse geöffnet bleiben, wobei das viskoplastische Kriechverhalten des Salzes die Schließung dieser noch geöffneten Restrisse bei vorhandenem Stützdruck weiter vorantreiben wird (Popp & Schulze 2009). Sind Fluide in den Restrißen eingeschlossen und können nicht entweichen, so stellt sich ein Druckgleichgewicht ein, das den Schließungsprozess zum Erliegen bringt. Wenn die Fluide restlos entweichen können, werden die Risse durch die Konvergenz vollständig geschlossen und bei Anwesenheit von Feuchte kann es durch Kristallbildung zum Verheilung der Risse kommen (Schulze 2007).

Für rechnerische Analysen zur Barrierenintegrität müssen vor allem die Dilatanzgrenze und die Verheilungsgrenze des Salzgesteins ermittelt und zusammen mit physikalischen Modellen zur Beschreibung der Schädigungs- und des Verheilungsprozesse in die bestehenden Stoffmodelle integriert werden. Auf dieser Grundlage kann das dilatante oder kontraktante Verhalten des Gesteins bei Überschreitung der Schädigungsgrenze bzw. bei Unterschreitung der Verheilungsgrenze numerisch simuliert werden. Eine Zusammenfassung verschiedener Stoffmodelle, die die Schädigungs- und Dilatanzentwicklung berücksichtigen, findet sich in BMBF (2006, 2010). Weitere Stoffmodelle beschrieben Aubertin (1993) und Chan et al. (1992, 1994, 1995), wobei auch ein Verheilungsansatz entwickelt, aber noch nicht in das Schädigungstoffmodell implementiert wurde. Lux et al. (2006) entwickelten einen neuen Verheilungsansatz, der bereits in Validationsberechnungen numerisch angewendet worden ist. Bezüglich dieses Verheilungsansatzes ist aber noch weiterer Forschungsbedarf vorhanden. Durch die Anwendung eines Verheilungsstoffmodells kann in Langzeitanalysen die Schädigungs- und Permeabilitätsrückbildung in Auflockerungszonen prognostiziert werden.

82.3 Sachlage am Standort

Im Erkundungsbergwerk am Standort Gorleben hat sich an der Kontur von allen untertägigen Hohlräumen eine Auflockerungszone infolge mechanischer Schädigung auf-

grund des vorliegenden Spannungsfeldes ausgebildet. Die Mächtigkeit dieser Auflockerungszone ist für Einzelhohlräume (Strecken oder Einlagerungshohlräume), deren Nahfeldwirkungen sich nicht überlagern, kleiner als der Streckendurchmesser. Bei Bohrungen resultiert die Auflockerung neben dem Spannungsfeld vor allem aus der bohrbedingten Beanspruchung des Salzgesteins und kann somit größer als der Bohrungsdurchmesser sein.

Die Auflockerungszone wird vor der Errichtung von Schacht- und Streckenverschlüssen in den Einbaupositionen durch schonendes Nachschneiden der Kontur (mittels einer Teilschnittmaschine) so weit wie möglich entfernt. Die möglicherweise verbleibende Restschädigungszone kann bei Bedarf durch Injektionen mittels Dichtmittel (z. B. Zementsuspensionen oder Wasserglas) abgedichtet werden. Im geschlossenen Endlager konvergiert das Gebirge auf den Versatz, bis dieser tragfähig wird, und auf die Verschlüsse, so dass durch den Stützdruck eine Rückbildung der Auflockerungszone erfolgen kann.

Bei der Auslegung des Endlagerbergwerkes ist nachzuweisen, dass die Dimensionierung der Hohlräume so gewählt ist, dass sich die Auflockerungszonen der verschiedenen Grubenbaue nicht überlagern. Damit wird verhindert, dass sie in Wechselwirkung miteinander treten und sich zusätzliche potenzielle Freisetzungspfade zwischen den Grubenbauen bilden können.

82.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Auflockerungszone kann aufgrund der Ausbildung einer (Sekundär)permeabilität um die Grubenbaue einen potentiellen Fließpfad für das Eindringen von Fluiden in das Endlager und einen Ausbreitungspfad für das Auspressen kontaminierter Fluide bilden. Da die Auflockerungszone auch in den Schächten und im Bereich der Verschlüsse entstehen kann, kann sie eine Verbindung bis in das grundwasserführende Deckgebirge herstellen. Durch eine entsprechende Planung und technische Maßnahmen (Entfernen der ALZ, Injektionen mittels Dichtmittel) wird bei der Endlagerauffahrung bzw. dem Verschluss des Endlagers sichergestellt, dass sich in den Auflockerungszonen des Bergwerkes keine durchgehenden Rissysteme bilden. Die Wechselwirkung der ALZ und technisch bedingten Kontaktzone wird in den FEP Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse sowie Sonstige Verschlussbauwerke beschrieben. Es wird unterstellt,

dass sich die Risse der Auflockerungszone während der Nachverschlussphase durch die Konvergenz mit der Zeit dauerhaft verschließen und verheilen.

82.5 Zeitliche Beschränkung

Die anfänglich vorhandene Auflockerungszone wird sich nach Verschluss des Endlagers nicht mehr vergrößern. Aufgrund der Verfüllung der Hohlräume mit Salzgrus und dessen Kompaktion durch Konvergenzvorgänge wird, wie geotechnische Simulationsrechnungen zeigen, nach wenigen Jahrzehnten im Salzgrusversatz ein Stützdruck in der Größenordnung des lithostatischen Teufendrucks vorherrschen. Dieser führt mit fortschreitender Konvergenz zum Verschließen bzw. Verheilen vorhandener Schädigung. Im Bereich geotechnischer Barrieren ist zu erwarten, dass ein entsprechender Gebirgsdruck wegen der höheren Materialsteifigkeit des Verschlusskörpers noch schneller wirksam wird. Dadurch sowie durch technische Maßnahmen zum Versiegeln der Auflockerungszone (z. B. durch Injektionen mit Dichtmaterialien) wird die integrale Dichtheit von Barriere und Auflockerungszone bereits mit der Fertigstellung der Barriere sichergestellt. In anderen Teilen des Grubengebäudes kann das Schließen der Auflockerungszone je nach Schädigungsgrad, Spannungsentwicklung und Größe einige hundert oder wenige tausend Jahren dauern.

82.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

82.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

82.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse

82.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Nach Erfahrungen im Salzbergbau und im Erkundungsbergwerk Gorleben bildet sich nach der Auffahrung von Grubenräumen abhängig von der Teufe eine Auflockerungszone an der Hohlraumkontur. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses FEP wird daher als "wahrscheinlich" eingestuft.

Beeinträchtigung auf die Initial-Barrieren: Die Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren ergibt sich aus der integralen Dichtheit des Verschlusses und der Auflockerungszone. Die Auflockerungszone wirkt sich somit direkt auf die Funktion von Strecken- und Schachtverschlüssen aus.

Wirkung in den Teilsystemen: Gemäß der Definition für die Teilsysteme wird die Auflockerungszone dem "Nahfeld" und den "Strecken und Schächten" zugeordnet.

82.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Konvergenz
Fluiddruck
Salzgruskompaktion
Quellen des Bentonits
Thermische Expansion oder Kontraktion
Wirtsgestein
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Das Verfüllmaterial der Bohrlöcher (gehört zu Inventar: Sonstige Stoffe) beeinflusst durch seine Steifigkeit die Ausbildung der ALZ.

Verschlussmaterial: die Ausbildung der ALZ im Bereich von Verschlussbauwerken hängt unmittelbar von der Steifigkeit der eingesetzten Verschlussmaterialien ab.

Schacht- und Streckenverschlüsse, sonst. Verschlussbauwerke: Die Installation von Strecken- und Schachtverschlüssen bzw. Dichtpfropfen beeinflusst z. B. über den Konturnachschnitt die Aus- oder Neubildung der ALZ.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Wenn die mechanische Stabilität der Verschlüsse durch die Alteration beeinträchtigt ist, ist der Stützdruck auf die Hohlraumkontur geringer, was zum Wiederaufreißen von Rissen in der Auflockerungszone führen kann.

Bohrlochverrohrung: Die Bohrlochverrohrung übt einen Stützdruck auf das Gebirge aus und beeinflusst so die Auflockerungszone.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Nach dem Ausfall ist der Stützdruck auf die Kontur verringert, so dass in der Auflockerungszone Risse wieder aufreißen können.

Konvergenz: Die Geschwindigkeit der Konvergenz der Grubenbaue bestimmt die Geschwindigkeit des Aufbaus eines Stützdruckes, der seinerseits die Rate der Rückbildung der ALZ vorgibt.

Fluiddruck: Der vorhandene Fluiddruck beeinflusst z. B. die Rückbildung der ALZ.

Salzgruskompaktion: Durch die Kompaktion des Versatzes (Salzgrus) wird ein Stützdruck auf die ALZ erzeugt.

Quellen des Bentonits: Das Quellen von Bentonit führt zu einer Vergrößerung des Stützdruckes auf die ALZ.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Diese Prozesse beeinflussen die Auflockerungszone.

Wirtsgestein: Die visko-elasto-plastischen Eigenschaften des Steinsalzes (vor allem die Lage der Dilatanzgrenze) beeinflussen die Ausbildung der ALZ.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen infolge der Auffahrung der Grubenbaue führen zum Überschreiten der Dilatanzgrenze in der Umgebung der Grubenbaue und somit zur Ausbildung einer ALZ.

Bemerkungen:

Thermische Expansion oder Kontraktion: Beide Prozesse führen zu Spannungsänderungen bzw. Spannungsumlagerungen, die ihrerseits die Ausbildung der ALZ beeinflussen.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Durch geochemische Prozesse kann sich zeitabhängig ihre Steifigkeit und damit die Geschwindigkeit des Aufbaus eines Stützdruckes ändern → Änderung Versatzmaterialeigenschaften.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Sonstige Verschlussbauwerke

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Porosität

Permeabilität

Kanalisation in Dichtelementen

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Quellen des Bentonits

Wirtsgestein

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Thermomigration

Matrixdiffusion

Begründungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Als Folge der Bohrbeanspruchung wird sich um ein Bohrloch eine hydraulisch wirksame ALZ ausbilden.

Strecken-/Schachtverschlüsse, sonst. Verschlussbauwerke: Die integrale Dichtheit der Verschlüsse wird maßgeblich von der hydraulischen Umläufigkeit über die ALZ bestimmt.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Das Vorliegen einer ALZ ermöglicht die Umströmung der Verschlüsse und damit die geochemische Änderung ihrer Eigenschaften.

Vorzeitiges Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses bzw. Dichtpfropfen: Das Vorliegen einer ALZ ermöglicht die Umströmung der Verschlüsse und kann damit ihr vorzeitiges Versagen hervorrufen.

Porosität: Die Sekundärporosität in der ALZ erzeugt eine Porosität im Wirtsgestein in der Umgebung der Grubenbaue.

Permeabilität: Ausbildung einer sekundären Permeabilität.

Kanalisation in Dichtelementen: Durch die Ausbildung einer ALZ wird die Kanalisation der Strömung in einem Dichtelement beeinflusst.

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Das Vorliegen einer ALZ um die Verschlüsse ermöglicht einen Lösungszutritt ins Grubengebäude.

Quellen des Bentonits: Durch die Auflockerung in der ALZ wird der Aufbau des Quelldrucks im Bentonit beeinflusst.

Wirtsgestein: Das Wirtsgestein wird durch die ALZ in seinen Eigenschaften, z. B. Permeabilität oder Festigkeit, beeinflusst.

Fluid- und Kohlenwasserstoffvorkommen: Die Ausbildung der ALZ beeinflusst die Mobilisierung und damit das Vorkommen bzw. die Verteilung von KW in der Gesteinskonkur.

Thermomigration: Ein wichtiger Parameter für die Berechnung der Thermomigration ist die Größe und Verteilung der Auflockerung in der ALZ.

Matrixdiffusion: Die Matrixdiffusion, d. h. der diffusive Übergang von gelösten Stoffen aus Bereichen, in denen advektiver Transport dominiert, in eine Matrix mit immobilen Porenwässern, wird wesentlich durch die in der ALZ vorliegende Porosität bestimmt, die u.U. als Matrix dient.

Bemerkungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Strömungsvorgänge im Grubengebäude, besonders im Bereich der Verschlussbauwerke, werden durch die Ausbildung der ALZ bestimmt. Der Einfluss auf die Strömungsvorgänge erfolgt indirekt über die Änderung der Permeabilität.

82.11 Offene Fragen

- Verständnis der Verheilungsphasen (komplexe Wechselwirkung zwischen Konvergenz, Dammkörper, Kontaktzone und ALZ)
- Verbesserung der Beschreibung von Rissbildungsprozessen und Modellierung mit mathematischen Modellen sowie deren Anwendung für den Nachweis zum Abbau von Konservativitäten

- Methodenentwicklung zur technische Abdichtung der Auflockerungszone, z. B. durch Injektionsverfahren mit langzeitstabilen Verschlussmaterialien

82.12 Literaturquellen

Aubertin, M., Sgaoula, J., Gill, D.E. (1993): A Damage Model for Rock Salt: Application to Tertiary Creep. - 7th Symposium on Salt, Vol. 1.

BMBF (2006): „Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen" - Verbundvorhaben Stoffgesetzvergleich, einzelne Teilberichte mit den Förderkennzeichen 02C1004 bis 02C1054.

BMBF (2010): „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten von realen Untertagebauwerken im Steinsalz" - Verbundvorhaben Stoffgesetzvergleich Phase 2, einzelne Teilberichte mit den Förderkennzeichen 02C1577 bis 02C1607.

Chan, K.S., Brodsky, N.S., Fossum, A.F., Bodner, S.R., Munson, D.E. (1994): Damage-induced nonassociated inelastic Flow in Rock Salt. - International Journal of Plasticity, Vol. 10, No. 6.

Chan et al. (1992): A Constitutive Model for Inelastic Flow and Damage Evolution in Solids under Triaxial Compression. - Mechanics of Materials, 14.

Chan, K.S., Fossum, A.F., Bodner, S.R., Munson, D.E. (1995): Constitutive Representation of Damage Healing in WIPP salt. - Proc. of the 35th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Daemen and Schulz (eds.); Balkema; Brookfield.

Lux, K.-H., Eberth, S., Düsterloh, U. (2006): Forschungsvorhaben: Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barrierenintegritäts- und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung und Schädigungsverheilung auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie. – BMBF-Forschungsvorhaben 02C0720, TU Clausthal.

Popp, T., K. Salzer, K., Wiedemann, M., Wilsnack, T., Voigt, H.-D. (2007): Petrophysical and rock-mechanical characterisation of the excavation-disturbed zone in tachyhydrit-bearing carnallitic salt rocks. In: K.-H. Lux, W. Minkley, M. Wallner, H.R. Hardy, Jr. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics; Proc. of the Sixth Conf. on the Mech. Behavior of Salt; Hannover.

Popp, T., Schulze, O. (2009): Application of the dilatancy concept to ascertain the damage and healing behaviour of rock salt. REPOS SAFE - International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations - Braunschweig, November 6 - 9, 2007. Conference Proceedings, GRS-S-49 (2009, April): 43-5.

Schulze, O. (2007): Investigation on damage and healing in salt. In: M. Wallner, K.H. Lux, W. Minkley, H. R. Hardy. The Mechanical Behaviour of Salt - Understanding of THMC Processes in Salt: 6th Conference (SaltMech6), Hannover, Germany, 22-25 May 2007. Publ.: Taylor and Francis: 17-26.

Wieczorek, K., Schwarzianek, P. (2004): Untersuchungen zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2). Abschlussbericht GRS-198, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit; Braunschweig.

Weiterführende Literatur:

Lux, K.-H. (2002): Gutachten im Auftrag des AkEnd, „Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften Teil A und B" sowie „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten". - TU Clausthal.

Lux, K.-H. (2007): Fundamentals and First Application of a new Healing Model for Rock Salt. - Proceedings of the 6th Conference of Saltmechanics; Hannover.

Nipp, H.-K., Heusermann, S. (2000): Erkundungsbergwerk Gorleben. Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3). Ergebnisbericht. - BGR, unveröffentl. Ber., 0120209: 45 S., 8 Tab., 92 Anl.; Hannover.

83 Wirtsgestein (2.2.02.01)

83.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Wirtsgestein werden alle im Salzstock vorkommenden Salinargesteine, exklusive des Hutgesteins, bezeichnet.

83.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das Wirtsgestein Salz umfasst alle salinaren Folgen einer Salzlagerstätte. Das Hutgestein wird im FEP Deck- und Nebengebirge behandelt.

Das Wirtsgestein Steinsalz wird unter anderem für Untertagedeponien chemotoxischer Abfälle sowie als Speicher für Öl und Gas genutzt.

83.3 Sachlage am Standort

Der Standort Gorleben liegt in einem Salzdiapir. Dieser besteht aus einem langgestreckten Sattel, der in der Diapirachse verläuft und aus den älteren Salinargesteinen der Staßfurt-Folge besteht. Er wird begleitet von Mulden mit salinaren Schichten der Leine- und Aller-Folge. Auf der südöstlichen Seite des Diapirs liegt ein Überhang, der ebenfalls aus Salinar der Staßfurt-Folge besteht. Dieser generelle Großfaltenbau wird durch diverse Quersfalten gegliedert. Im Bereich des Kaliflöz Staßfurt (z2SF) kommt es zu extremer Isoklinalfaltung. Es kann durch extreme Faltung zur Ausdünnung bis zum Ausfall von Schichten kommen. Anhydritgestein liegt aufgrund derartiger Prozesse boudiniert oder zerblockt vor. Größere Lösungsreservoirs wurden im Zentralbereich des Sattels, im Hauptsalz der Staßfurt-Folge nicht angetroffen. Der Gehalt wässriger salinärer Lösungen beträgt im Hauptsalz der Staßfurt-Folge 0,012 bis 0,017 Gew.-%. (siehe FEP Fluidvorkommen im Wirtsgestein). Im Sattelkern des Hauptsattels, vorwiegend im Knäuelsalz, wurden unregelmäßig verteilte, nesterartige KW Vorkommen angetroffen (siehe FEP Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein).

Die Einlagerungsbereiche sind am Standort Gorleben im Hauptsalz der Staßfurt-Folge geplant, das den zentralen Hauptsattel des Salzstocks aufbaut. Das Hauptsalz (z2HS) besteht im Liegenden (Knäuelsalz, z2HS1) im Mittel zu 93,5 Gew.-% aus Steinsalz, zu

6 Gew.- % aus Anhydrit und 0,5 Gew.- % unlöslichem Rückstand. Ins Hangende (Kristallbrockensalz, z2HS3 bis Kieseritische Übergangsschichten, z2UE) nimmt der Anhydritgehalt auf unter 2 Gew.- % ab. Im Kristallbrockensalz setzt eine Polyhalitführung ein, die in den Kieseritischen Übergangsschichten 4 Gew.- % erreichen kann. Der Steinsalzgehalt bleibt mit ca. 95 Gew.- % nahezu konstant. Der Anhydrit kommt in Linienresten und Knäueln, z. T. in Streifen angereichert, vor.

Das Hauptsalz besitzt eine um den Faktor 4 höhere Kriecheigenschaft (z2HS - Kriechklasse 6; Kriechgesetz siehe Plischke 2002) als die jüngeren salinaren Folgen (Leine- und Aller-Folge, z3OS - Kriechklasse 4; Kriechgesetz siehe Plischke 2002).

Der Bereich an der Grenze Staßfurt-/Leine-Folge, der das Kaliflöz Staßfurt bis hin zum Hauptanhydrit der Leine-Folge umfasst, zählt nicht mehr zum geplanten Einlagerungsbereich, da das Kaliflöz aus leicht löslichen, wie auch thermisch instabilen Kalisalzen besteht und der Hauptanhydrit auf Grund seiner Klüftung als möglicher Speicherort von wässrigen Lösungsvorkommen und als Lösungspfad gilt. Die anhydritischen Schichten der jüngeren salinaren Zechstein-Folgen (Leine- und Aller-Folge), können auf Grund ihrer Klüftigkeit, Fluide speichern. Zu diesen gehören neben dem Hauptanhydrit (z3HA) die Gorleben-Bank (z3OSM), das Anhydritmittelsalz (z3AM) und der Pegmatitanhydrit (z4PA).

Die Eigenschaften des Wirtsgesteins sind in der Standortbeschreibung (Bornemann et al. 2008) dargelegt und sind bei der Auffahrung der Endlagerbereiche und als Randbedingung bei Modellrechnungen zu berücksichtigen.

83.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Wirtsgesteinseigenschaften haben wesentlichen Einfluss auf den Ablauf thermischer, mechanischer, hydraulischer und chemischer Prozesse im Endlagerbereich. In der BGR durchgeführte thermophysikalische Laboruntersuchungen an Salzproben ergaben folgende Ergebnisse: „Salzgesteine besitzen nur eine sehr geringe Porosität. Die ermittelten Messwerte für die Proben des Standortes Gorleben liegen zwischen 0 % und 1,6 %. [...] Die Messungen ergaben, dass die Wärmeleitfähigkeit von Haliten mit steigender Temperatur abnimmt. Bei 20 °C liegt sie bei ca. 5,5 W/(mK) und bei 200 °C bei ca. 3,5 W/(mK). [...] Im Mittel beträgt der lineare Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-5}/K$ bei den Haliten.“ (Bräuer et. al. 2011).

83.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

83.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

83.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

83.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

83.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Wirtsgestein ist eine Randbedingung des Endlagersystems.

Wirkung in den Teilsystemen: Das Wirtsgestein ist identisch mit dem gleichnamigen Teilsystem und hat als solches keine Wirkung auf die anderen Teilsysteme.

Einwirkung auf Initial-Barrieren: Das Wirtsgestein hat als Randbedingung keinen Einfluss auf die Initial-Barrieren.

83.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erdbeben
Diapirismus
Subrosion
Bildung kryogener Klüfte
Glaziale Rinnenbildung
Konvergenz
Auflösung und Ausfällung
Wärmeproduktion
Thermische Expansion oder Kontraktion
Verdampfen von Wasser
Strahlungsinduzierte Aktivierung
Radiolyse
Auflockerungszone
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Thermomigration
Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Diapirismus: Durch den Salzaufstieg verändern sich die Lagerungsverhältnisse der Schichten.

Erdbeben: Ein Erdbeben kann Auswirkungen auf das Wirtsgestein haben.

Bildung kryogener Klüfte: Kryogene Klüfte verändern die Eigenschaften des Wirtsgesteins in der Nähe des Salzspiegels.

Glaziale Rinnenbildung: Eine tiefe Rinnenbildung kann das Wirtsgestein direkt betreffen.

Konvergenz: Die auflaufende Konvergenz verbessert die Integrität des Wirtsgesteins.

Auflösung und Ausfällung: Verändern die mineralogische Zusammensetzung des Wirtsgesteins.

Wärmeproduktion, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Thermomigration: Erhöhte Temperaturen oder Spannungszustände verändern die Kriechfähigkeit des Steinsalzes.

Verdampfen von Wasser, Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Veränderte Wassergehalte verändern die Eigenschaften des Steinsalzes.

Subrosion: Der Kontakt mit Grundwasser führt zu einer Auflösung der Salzsichten im Salzspiegelbereich.

Auflockerungszone: Durch die Bildung einer Auflockerungszone entsteht eine zusätzliche Klüftigkeit im Wirtsgestein.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Klüfte im Wirtsgestein beeinflussen die Barriereigenschaften des Wirtsgesteins

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein, Thermochemische Sulfatreduktion: KW und die thermochemische Sulfatreduktion beeinflussen die Eigenschaften des Wirtsgesteins.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Durch Temperaturänderungen im Salzspiegelbereich kann es zu einer Thermische Expansion oder Kontraktion kommen, die indirekt zu Klüftbildungen oder -verschluss führen.

Strahlungsinduzierte Aktivierung, Radiolyse: Durch den Zerfall der Radionuklide wird das Salzgestein beeinflusst.

Resultierende FEP: keine

Bemerkungen:

Kohlenwasserstoffvorkommen im Salz; Klüfte im Wirtsgestein und Fluidvorkommen im Wirtsgestein werden nicht eigens als resultierende FEP aufgeführt, da sie aus der Genese der Salzlagerstätte herzuleiten und damit Bestandteile des Wirtsgesteins sind.

Beeinflusste FEP:

Diapirismus

Subrosion

Bildung kryogener Klüfte

Glaziale Rinnenbildung

Konvergenz

Auflösung und Ausfällung

Thermische Expansion oder Kontraktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Auflockerungszone

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Thermomigration

Thermochemische Sulfatreduktion

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Sorption und Desorption

Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

Begründungen:

Diapirismus: Die verschiedenen Salzgesteine sind unterschiedlich kriechfähig und beeinflussen dadurch den Aufstieg des Salzkörpers.

Subrosion: Die unterschiedlichen Salzgesteine des Wirtsgesteins weisen unterschiedliche Löslichkeiten auf und beeinflussen so den Umfang der Subrosion.

Bildung kryogener Klüfte: Die Gesteinseigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen Umfang und Art der kryogenen Klüfte.

Glaziale Rinnenbildung: Das Ausmaß der Rinnenbildung ist von der Festigkeit des Untergrundes abhängig.

Konvergenz: Die Zusammensetzung des Wirtsgesteins beeinflusst die Konvergenz.

Auflösung und Ausfällung: Die vorhandenen Feststoffe bestimmen mögliche Auflösungsprozesse.

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die spezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen seine Expansion oder Kontraktion.

Strahlungsinduzierte Aktivierung: Das vorhandene Wirtsgestein bestimmt das Ausmaß einer Aktivierung.

Radiolyse: Die Eigenschaften des Steinsalzes, das in unmittelbarer Umgebung der Abfälle ansteht, bestimmt das Ausmaß seiner Radiolyse.

Auflockerungszone: Die visko-elasto-plastischen Eigenschaften des Steinsalzes beeinflussen die Ausbildung der Auflockerungszone.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Die Zusammensetzung des Wirtsgesteins beeinflusst eine Klüftbildung.

Spannungsänderung und Spannungumlagerung: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins, wie das prinzipielle Materialverhalten oder die Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeit beeinflussen die Spannungsänderung und Spannungumlagerung.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen Art und Menge der Fluidvorkommen.

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen Art und Menge der Kohlenwasserstoffe.

Thermomigration: Im Wirtsgestein sind die Lösungseinschlüsse unregelmäßig verteilt und an bestimmte Gesteinspartien gebunden.

Thermochemische Sulfatreduktion: Eine Thermochemische Sulfatreduktion ist möglich, wenn Kohlenwasserstoffe, entsprechend hohe Temperaturen und Anhydrit im Wirtsgestein vorhanden sind.

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein: Die lithologischen Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen maßgeblich die Ausbildung des intergranularen Porenraums.

Sorption und Desorption: Die Ausgangsmaterialien im Endlagersystem bestimmen in welchem Ausmaß eine Sorption möglich ist.

Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen das Absinkverhalten.

83.11 Offene Fragen

Für eine exaktere Bewertung der Barriereigenschaften des Wirtsgesteins sowie seines Verhaltens bei Temperaturerhöhung und Deformation sind zusätzliche mineralogisch-geochemische, strukturelle und petrophysikalische Untersuchungen erforderlich. Ein großer Teil der noch notwendigen Untersuchungen ist durch eigene FEP abgedeckt (z. B. Kohlenwasserstoffe, Lösungsvorkommen, Klüfte im Wirtsgestein, Störungszonen). Offene Fragen bestehen für die Themenfelder „absinkende Hauptanhydritschollen“, „Einfluss von Wassergehalten auf das Kriechvermögen des Wirtsgesteins“, „selektive Subrosion“ sowie „Deformation von Hauptsalz und Anhydritgestein“.

83.12 Literaturquellen

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben – Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Bräuer, V. et al. (2011): Description of the Gorleben site / Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. - 4. Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome / - Hannover : Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe, 2011.

Plischke, I. (2002): Projekt Gorleben - Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ - Ingenieurgeologische Erkundung der Homogenbereiche. - BGR, Ber.: 28 S., 24 S. Anh., 2 Anl., 16 Abb., 4 Tab.; Hannover.

Schramm, M., Kühnlenz, T., Mingerzahn, G., Hammer, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation BGR, Ber.: 160 S.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Bornemann, O., Mingerzahn, G., Behlau, J. 2001: Characterization of sites for Salt Caverns in the Middle European Zechstein Salt Basin using Exploration Experiences of the Gorleben Salt Dome. SMRI-Meeting; Albuquerque.

Hemmerich, M., Behlau, J., Fleig, S. (2004): Geological 3D-Modell of the Rüdersdorf Gas Cavern Storage Project, Germany. - SMRI, Fall 2004 Conference Berlin, Technical Meeting Papers: 266-274, 5 Abb.; Clarks Summit (Penns.).

Keller, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz. Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz. Beitrag für das Projekt ISIBEL. - BGR, Ber. (überarbeitete Vers. v. 31.12.2005); Hannover.

Kleinefeld, B., Behlau, J., Schweinsberg, J. (2008): Safe and economic cavern construction in the Etzel Cavern Field based on geological 3D-Modelling. SMRI-Spring; Porto (Portugal).

Schweinsberg, H.J., Foltas, F., Wilke F. (2004): Efficient and Tailor-made Cavern Construction in Domal Salt for Long Term Oil Storage. SMRI-Meeting; Berlin.

Warren, J. K. (2006): Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons - Springer Verlag: 1035 S.; Heidelberg.

Wilke, F., Bornemann, O., Hellberg, C. (2001): Geological Interpretation of Domal Salt Structures in the North European Zechstein Formation: Influence on Cavern Development. SMRI-Meeting; Albuquerque.

84 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein (2.2.02.02)

84.1 Definition/Kurzbeschreibung

Klüfte sind makroskopisch sichtbare Trennfugen im Gestein, die keine oder nur sehr geringe Dislokationen an den Trennflächen aufweisen. Sie sind zu unterscheiden von Störungen, die durch eine deutliche Dislokation der an eine Störungszone angrenzenden Gesteine gekennzeichnet sind.

84.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Klüfte und Störungen sind meist natürlichen Ursprungs, aber auch die Auffahrung eines Endlagers hat Klüfte in Form der Auflockerungszone zur Folge (vgl. FEP Auflockerungszone).

Die Bildung von Klüften beginnt mit der durch Deformation oder Wärmeeintrag verursachten Ausbildung von Rissen. Als Ursachen für die Entstehung von Rissen und Klüften im Salzgestein gelten vor allem tektonische Prozesse, die trotz der plastischen Eigenschaften von Salzgestein an den Prozess des Salzaufstiegs (Halokinese) gebunden sind. Klüfte entstehen bei Spannungsdifferenzen am Salzspiegel oder an Grenzflächen zwischen Anhydrit und Steinsalz. Wenn Spannungsdifferenzen die Festigkeit des Wirtsgesteins überschreiten, bilden sich Risse, die sich zu Klüften vergrößern können. Möglicherweise können Vergletscherungen für die Bildung von Klüften im Topbereich von Salzstrukturen verantwortlich sein (siehe FEP Bildung kryogener Klüfte). Risse können durch Fluiddruck entstehen sofern das Minimalspannungskriterium überschritten wird. In diesem Fall infiltrieren die Fluide die Risse, worauf diese wieder verheilen.

Unter andauernd kompressiver Belastung verheilen Klüfte und Risse im Steinsalz aufgrund seines hohen Kriechvermögens relativ schnell. Die Permeabilitäten des vormals geklüfteten Gesteins erreichen im Ergebnis der Verheilprozesse wieder die Werte des ungeklüfteten Gesteins. Die Diffusion trägt zur Verheilung bei, sie hängt unter anderem vom Wassergehalt auf den Korngrenzen bzw. im Porenraum ab. Neben der Kriechfähigkeit sind chemische Reaktionen bei Vorhandensein von Wasser als Ursache für ein zumindest teilweises Verschließen von Klüften zu nennen (Popp et al. 2007, Eberth 2007).

84.3 Sachlage am Standort

Klüfte sind lokal in jedem Salzstock in den Grenzbereichen von kompetenten und inkompetenten (z. B. Zechstein 2/Zechstein 3-Grenzbereich) bzw. in den kompetenten Salzgesteinen selbst (z. B. Hauptanhydrit) vorhanden. Auch im Salzstock Gorleben wurden Klüfte nachgewiesen, die in der Regel verheilt sind und sich vor allem im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes, insbesondere im z3-Umfeld der Kaliflöz-Aufdomung befinden. Das Kluftinventar besteht aus schichtparallelen oder die Schichtung in einem Winkel schneidenden Klüften. Die Lage und Raumorientierung der Klüfte sowie die Kluftgeometrien (Verlauf, Kluftöffnungsweite, Länge) hängen von der Beanspruchung der Salzgesteine und von den Materialeigenschaften ab. Es bestehen Abhängigkeiten der Kluftausbildung von z. B. Lithologie, Teufenposition und/oder von der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der Salzsichten. Auch wird von einem Einfluss der strukturgeologischen Position der betroffenen Gesteinsschichten im Salzstock und der geomechanischen Eigenschaften der Gesteine auf die Häufigkeit und Ausbildung der Klüfte ausgegangen. Die Öffnungsweiten der im Salzstock Gorleben nachgewiesenen, inzwischen überwiegend verheilten Klüfte schwanken im mm- bis dm-Maßstab und die Kluftlängen bewegen sich im Dezimeter- bis Zehnermeter-Bereich. Ein größeres System von untereinander kommunizierenden Klüften wurde nicht angetroffen.

In den Bohrungen Go1003 und Go1004 wurden Störungen im Hauptanhydrit angetroffen, die Schichtausfälle oder -verdopplungen zur Folge haben. Diese Störungen sind durch Steinsalz oder Carnallit verheilt (Bornemann et al. 2008). Die Mehrzahl der im Salzstock Gorleben festgestellten Klüfte ist durch Kluftmineralisationen halitischer oder carnallitischer Zusammensetzung verheilt. Derartige Verheilungsprozesse führten dazu, dass die geomechanischen Eigenschaften der ehemals geklüfteten, jetzt verheilten Gesteine denen von ungeklüfteten Gesteinen entsprechen. Offene, Fluid-erfüllte Klüfte (vgl. FEP Fluidvorkommen im Wirtsgestein) sind nur an bestimmte Bereiche innerhalb der stratigraphischen Abfolge (z. B. Hauptanhydrit, Gorleben-Bank) oder an spezielle salttektonisch entstandene Strukturen (z. B. Grenzbereich z2/z3 bei Ausfall größerer Schichtpakete, Mächtigkeitsänderungen des Kaliflözes) gebunden. Die während der Erkundung des Salzstockes Gorleben im Salzspiegelbereich nachgewiesenen, auf den Einsatz des Gefrierfahrens beim Schachtabteufen zurückzuführenden Klüfte sind verheilt, d. h. durch Mineralneubildungen verschlossen.

84.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Im Kernbereich des Staßfurt-Hauptsalzes wurden bislang keine offenen Klüfte nachgewiesen (Bornemann et al. 2008). Aufgrund der Fließfähigkeit des Steinsalzes und des isotropen Spannungszustandes dieser Gesteine können offene geogene Klüftbildungen in diesen Gesteinspartien ausgeschlossen werden (Weber et al. 2013). Verheilte Klüfte stellen keine Beeinträchtigung des Wirtsgesteins dar. Dies wird auch durch vielfältige Beobachtungen in anderen, ähnlich aufgebauten Salzstrukturen gestützt. Die innerhalb des Salzstocks Gorleben in Anhydritgesteinen der Leine-Folge nachgewiesenen, offenen Klüfte stellen räumlich isolierte Bildungen dar, die kein größeres zusammenhängendes Kluftsystem ergeben, was auch durch Druckaufbaumessungen bestätigt wurde (Nowak et al. 2002).

84.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

84.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

84.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

84.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein

84.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Vorkommen von salztektonisch verursachten Klüften im Wirtsgestein ist nachgewiesen und damit als wahrscheinlich einzustufen.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP bezieht sich definitionsgemäß auf den Teilbereich Wirtsgestein.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Wo offene, fluiderfüllte Klüfte vorhanden sind, ist eine zumindest partielle und zeitlich befristete Durchströmbarkeit des Wirtsgesteins möglich.

84.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Diapirismus

Subrosion

Konvergenz

Fluiddruck

Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Diapirismus: Ein verstärkter Salzaufstieg kann wie in der Vergangenheit während des Diapirstadiums zu erneuter Klüftbildung führen, wenn mit dem Verformungsverhalten der Salzsichten Dilatanz verbunden ist (vgl. FEP Diapirismus).

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung; Fluiddruck; Konvergenz: Ein variierender Fluiddruck, die Konvergenz und Spannungsänderungen bzw. Spannungsumlagerungen können zu einer Klüfterweiterung oder zu einem Klüftverschluss beitragen.

Wirtsgestein: Die Zusammensetzung des Wirtsgesteins beeinflusst eine Klüftbildung.

Subrosion: Am Salzspiegel vorhandene Klüfte könnten durch die Subrosion verbreitert werden.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Permeabilität

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Wirtsgestein

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Diffusion

Matrixdiffusion

Begründungen:

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Da Klüfte möglicherweise andere Permeabilitäten als das umgebende Wirtsgestein aufweisen, beeinflussen sie das Vorkommen von Fluiden.

Permeabilität; Wirtsgestein: Klüfte können die Permeabilität des Wirtsgesteins verändern.

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein: Da Klüfte möglicherweise andere Permeabilitäten als das umgebende Wirtsgestein aufweisen, beeinflussen sie das Vorkommen von Kohlenwasserstoffen.

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein; Lösungszutritt ins Grubengebäude: Klüfte im Wirtsgestein beeinflussen lokal die Barriereigenschaften des

Wirtsgesteins und somit die Permeabilität, sowie die Gasinfiltration ins Salzgestein. Umgekehrt wird ein Lösungszutritt ins Grubengebäude möglicherweise erleichtert.

Diffusion; Matrixdiffusion: Die Ausbildung der Klüfte beeinflusst die Diffusion von Stoffen.

84.11 Offene Fragen

Genese und Verheilen von Klüften im Wirtsgestein, insbesondere im Hauptsalz.

84.12 Literaturquellen

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Fischbeck, R., Bornemann, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen. - Geol. Jb., A 142: 233-256; Hannover.

Weber, J.R., Hammer, J., Behlau, J., Schulze, O., Heemann, U., Mingerzahn, G., Popp, T. (2013): Offene Klüfte im Zentralbereich des Hauptsalzes im Salzstock Gorleben unwahrscheinlich. Stellungnahme von BGR und IfG; Hannover, Januar 2013.

Weiterführende Literatur:

Eberth, S. (2007): Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge.

Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. - Abschlussbericht des Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Salzgitter.

Schulze, O. (2007): Investigations on damage and healing of rock salt. In K.-H. Lux, W. Minkley, M. Wallner, & H.R. Hardy, Jr. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics; Proc. of the Sixth Conf. on the Mech. Behavior of Salt, Hannover 2007, Lisse: Francis & Taylor (Balkema): 33-43.

Warren, J. K. (2006): Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons. - Springer Verlag: 1035 S.; Heidelberg.

Weiss, H. M. (1980): Möglichkeiten der Entstehung sowie Art, Umfang, tektonische Stellung und nachträgliches Verhalten von Rissen und Klüften im Salzgebirge. Literaturstudie. - Univ. Heidelberg, Inst. f. Sedimentforschung, GSF-Bericht T 200: 96 S.; Heidelberg.

85 Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

85.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP umfasst Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges wie Aufbau, Zusammensetzung der Schichten, Festigkeit, Dichte, die in den Gesteinen anzutreffenden geohydraulischen Eigenschaften und die Grundwasserverhältnisse.

85.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der zeitliche Ablauf und das Ausmaß der Salzaufstiegsprozesse sowie die Faziesbedingungen der postpermischen Sedimentationsprozesse und die Intensität möglicher Erosionsprozesse sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges von Salzstöcken. Das Studium des Deck- und Nebengebirges liefert neben wichtigen Informationen zum zeitlichen Ablauf der Salzstockentwicklung vor allem notwendige Daten für die Beschreibung des Fernfeldes im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen.

85.3 Sachlage am Standort

Die Abfolge des Deck- und Nebengebirges umfasst triassische bis quartäre Gesteinschichten, wobei das Quartär über dem Salzstock innerhalb der Gorlebener Rinne eine hohe Mächtigkeit aufweist. Der Aufbau des Deckgebirges wird durch den Salzaufstieg und kaltzeitliche Prozesse bestimmt. Die präquartären Schichten wurden durch den Aufstieg über dem Salzstock aufgewölbt. Im Bereich der elsterzeitlichen glazigenen Rinne erfolgte eine Erosion dieser Schichten, so dass quartärzeitliches Material direkt dem Hutgestein aufliegt.

Jüngere saalezeitliche Eisvorstöße verursachten eistektonische Bewegungen, die zur Stauchung und Verschuppung der Deckgebirgsschichten von Teilbereichen des für die Endlagerung vorgesehenen Salzstockes führten (vgl. FEP Vollständige Inlandvereisung). Hydrogeologisch kann innerhalb des Deck- und Nebengebirges vereinfacht zwischen einem unteren, Salzwasser-erfüllten und einem oberen, Süßwasser-erfüllten Aquifer unterschieden werden. Die Grundwasserströmung verläuft in der glazigenen

Rinne SW nach NE und außerhalb der Rinne nördlich des Salzstocks in nordwestlicher Richtung.

Das Deck- und Nebengebirge ist in der Standortbeschreibung Gorleben (Klinge et al. 2007; Köthe et al. 2007; vgl. a. Keller 2007) und durch die quartärgeologische Kartierung von Duphorn et al. (1983) beschrieben.

85.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Deckgebirgseigenschaften haben wesentlichen Einfluss auf die Subrosion und den Ablauf von Strömungs- und Transportprozessen im Grundwasser des Deckgebirges (siehe FEP Subrosion und FEP Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge). Das Hutgestein des Salzstocks wird aufgrund seiner hydraulischen Eigenschaften als Teil des Deckgebirges behandelt.

85.5 Zeitliche Beschränkung

Die Zusammensetzung und der Aufbau des Deckgebirges sowie die in der heutigen Form bestehenden hydrogeologischen Verhältnisse können im Verlauf von erwarteten kommenden Kaltzeiten vollständig verändert werden.

85.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

85.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

85.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

85.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Deck- und Nebengebirge ist eine Randbedingung des Endlagerstandortes.

Wirkung in den Teilsystemen: Das Deck- und Nebengebirge ist identisch mit dem Teilsystem und hat als solches keine Auswirkung auf die anderen Teilsysteme.

Einwirkung auf Initial-Barrieren: Das Deck- und Nebengebirge ist per Definition keine Initial-Barriere.

85.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erosion

Sedimentation

Diagenese

Diapirismus

Transgression oder Regression

Permafrost

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Glaziale Rinnenbildung

Auflösung und Ausfällung

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Erosion, Sedimentation, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung: Verändern die Mächtigkeit des Deck- und Nebengebirges.

Diagenese, Transgression oder Regression, Auflösung und Ausfällung: Verändern die Zusammensetzung des Deck- und Nebengebirges.

Diapirismus, Glaziale Rinnenbildung: Verändert die Lage des Deck- und Nebengebirges.

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge, Permafrost: Die Bildung von Störungen und Störungszonen verändert die strukturelle Ausprägung des Deck- und Nebengebirges.

Resultierende FEP:

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die hydrochemischen Verhältnisse werden durch die Beschaffenheit des Deck- und Nebengebirges bestimmt.

Beeinflusste FEP:

Erosion

Diagenese

Glaziale Rinnenbildung

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Thermische Expansion oder Kontraktion

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge

Sorption und Desorption

Kolloide

Begründungen:

Thermische Expansion oder Kontraktion: Die spezifischen Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges bestimmen seine Expansion oder Kontraktion.

Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge, Sorption und Desorption, Kolloide: Die Zusammensetzung und der strukturelle Aufbau des Deck- und Nebengebirges bestimmen den Ablauf mikrobieller Prozesse innerhalb der Schichten und steuern Sorption und Desorption und Kolloidbildung.

Erosion, Glaziale Rinnenbildung: Die Beschaffenheit des Deck- und Nebengebirge beeinflusst den Prozess der Erosion der Rinnenbildung.

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Die vorhandene Wassersäule im Deck- und Nebengebirge definiert den am Schacht anstehenden hydraulischen Druck.

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge: Die Bildung von Störungen und Störungszonen hat Einfluss auf die Beschaffenheit des Deck- und Nebengebirge.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Strömung von Fluiden im Deck- und Nebengebirge wird durch die Zusammensetzung und seinen Aufbau beeinflusst.

Spannungsänderung und Spannungumlagerung: Spannungsänderung und Spannungumlagerung im Wirtsgestein können sich aus den Mächtigkeitsschwankungen des Deck- und Nebengebirges aufgrund geologischer Prozesse ergeben.

Diagenese: Diagenetische Prozesse werden durch Deck- und Nebengebirge beeinflusst und beeinflussen die Sedimente selbst.

85.11 Offene Fragen

Keine.

85.12 Literaturquellen

Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U., Schröder, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben, Abschl.-Bericht Univ. Kiel. - Univ. Kiel (PTB-Bestell-Nr. 73760; BGR-Archiv-Nr. 103 714): 265 S.; Kiel.

Keller, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz. Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz. Beitrag für das Projekt ISIBEL. - BGR, Ber. (überarbeitete Vers. v. 31.12.2005); Hannover.

Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71; Hannover.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72; Hannover.

Weitergehende Literatur:

Appel, D., Kreuzsch, J. (2006): Das Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Salzstock. Im Auftrag von Greenpeace e. V. - Gruppe Ökologie e. V.: 40 S.; Hannover.

Keller, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 24 S.; Hannover.

Noseck, U., Fahrenholz, C., Fein, E., Flügge, J., Pröhl, G., Schneider, A. (2009): Impact of climate change on far-field and biosphere processes for a HLW repository in rock salt. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-241: 272 S.; Braunschweig.

86 Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge (2.2.04.01)

86.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter einer Störung wird eine Trennfuge im Gebirge verstanden, an der ein Versatz der beiden angrenzenden Gesteinspakete auftritt. Versatzbeträge entlang von Störungen können im Bereich von Zentimetern bis Kilometern liegen. Existiert ein räumlich ausgedehnter Bereich, in dem mehrere Störungen als Begleit- oder Parallelstörungen vorkommen, so spricht man von einer Störungszone.

86.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das FEP umfasst das Vorkommen und die Eigenschaften von großräumigen Störungszonen im Deckgebirge und im salzstocknahen Nebengebirge. Die in flach lagern den Salzschichten häufig nachgewiesenen Störungszonen sind nicht Bestandteil dieses FEP. Genetisch sind die Störungen im Deck- und Nebengebirge mit tektonischen Prozessen vor oder im Verlaufe des Salzaufstiegs, mit diagenetischen bzw. metamorphen Veränderungen der Sedimente, mit Einsturz- bzw. Nachfallprozessen im Ergebnis einer erhöhten Subrosion von Salzstöcken (Erdfälle, Subrosionssenken) oder mit eistektonischen Prozessen, wie z. B. Entlastungsvorgängen beim Rückzug einer Inlandvereisung verbunden. Subrosive Prozesse können zur Bildung von Hohlräumen führen. Das Einstürzen dieser Hohlräume bewirkt lokal eine Absenkung der Erdoberfläche. Derartige Erdfälle können veränderte Grundwassermigrations- bzw. Transportpfade in der Geosphäre zur Folge haben, wenn ursprünglich voneinander getrennte Aquifere eine Verbindung bekommen.

Störungen im Topbereich von Salzstrukturen (Scheitelstörungen) entstehen in der Regel durch den Aufstieg des Diapirs und gehören zum typischen Formeninventar norddeutscher Salzstöcke. Des Weiteren können im Endlager ablaufende thermische Prozesse lokale Differenzialbewegungen induzieren. Die von den Abfällen ausgehende Wärmeentwicklung kann lokal über den Einlagerungsbereichen für eine kurze Zeit von etwa Zehntausend Jahren zur Hebung des Deckgebirges um einige Meter führen.

86.3 Sachlage am Standort

Differenzialbewegungen an den Flanken und im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben sind, verursacht durch den Aufstieg des Salzstocks, für den Zeitraum Oberjura bis Mitteloligozän, d. h. vor 150 bis ca. 30 Mio. Jahren lokal nachgewiesen (Bornemann et al. 2008; Zirngast 1991a, 1991b, 1996, 2004; Zirngast et al. 2004). Lediglich im Übergangsbereich des Salzstocks Gorleben zur Struktur Rambow ist ein für Salzdiapire typisches Scheitelgrabensystem erhalten, das durch quartärzeitliche Prozesse nicht erodiert wurde. Über dem Salzstock Gorleben wurde das Deckgebirge im Ergebnis des Salzaufstieges an den ehemals vorhandenen Scheitelstörungen intensiv bewegt. Das führte zu einer intensiven Zerblockung und Auflockerung der tertiären Schichten. Dieser sehr hohe Störungsgrad ist durch die Flachseismik nicht mehr auflösbar (s. Köthe et al. 2007). Seit dem Miozän und auch aktuell weist der Salzstock eine sehr geringe Aufwärtsbewegung (siehe FEP Diapirismus) auf, was zu keinen Verwerfungen im Deck- und Nebengebirge geführt hat. Im Deckgebirge über dem Salzstock Rambow existieren Erdfälle und eine Subrosionssenke, die in der geologischen Vergangenheit entstanden sind. Sie sind heute z. T. mit den Sedimenten der jüngeren Kaltzeiten gefüllt. Über dem Salzstock Gorleben werden keine, auf Subrosionsprozesse zurückzuführenden Oberflächenabsenkungen beobachtet.

Eine vollständige Rekonstruktion des Ausmaßes der Scheitelgrabenbildung wird durch das Erosionsgeschehen im Verlaufe der quartärzeitlichen Vereisungen unmöglich gemacht. Durch das vorrückende Inlandeis wurden die känozoischen Schichten eistektonisch versetzt und verschuppt.

Aufgrund der elsterzeitlichen Umgestaltung sind im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben großräumige, an den Salzaufstieg gebundene Störungszonen mit großen Versatzbeträgen nicht mehr nachzuweisen und oberhalb der geplanten Einlagerungsbereiche rezent auch nicht vorhanden.

Eine Sockelstörung unterhalb des Salzstocks konnte bislang mittels seismischen Untersuchungen nicht nachgewiesen werden (Marschall & Neumann 1984). Aus den technisch bedingten Auflösungsbeschränkungen der Seismik ergibt sich, dass: „... unter der Salzstruktur Gorleben-Rambow Störungen mit geringem Versatz (< 50 m) vorhanden sein können, die jedoch in der Reflexionsseismik nicht erkennbar sind.“ (Köthe et al. 2007, S.154).

86.4 Standortspezifische Auswirkungen

Störungszonen mit erhöhten Permeabilitäten können Einfluss auf die hydraulischen Deckgebirgseigenschaften haben. So könnten glaziär bedingte Aufschuppungen ältere kaltzeitliche, Grundwasser-leitende Sedimente mit neuen kaltzeitlichen, gut oder gering leitenden Ablagerungen verbinden.

Die Ausdehnung des Salzkörpers, durch die Aufheizung aufgrund der Einlagerung wärmeproduzierender Abfälle, wird eine Hebung des Deckgebirges in seiner Gesamtheit von wenigen Metern nach sich ziehen. Es ist nicht zu erwarten, dass es dabei zur lokalen Ausbildung von hydraulisch aktiven Störungszonen bzw. Grundwasserwegsamkeiten kommt. Langfristig wirksame geologische Prozesse können zu lokalen Differenzialbewegungen, d. h. zur Bildung von Störungszonen führen. Auswirkungen werden aber erst nach einer Zeitspanne möglich sein, die größer als der Nachweiszeitraum ist. Die Auswirkungen von Tektonik, Salzstockgenese bzw. Halokinese und Subrosion werden in den jeweiligen FEP beschrieben. Die Bildung von auf die Diagenese der Lockersedimente des Deckgebirges zurückzuführenden Störungen ist in den nächsten Millionen Jahren am Standort Gorleben wegen einer fehlenden starken Absenkung der Erdkruste nicht zu erwarten. Zum Nachweis einer möglichen Sockelstörung wurden im Rahmen der Salzstockexploration 1984 seismische Untersuchungen in Form von drei Salzstock- bzw. Salzflankenunterschießungen durchgeführt. Die daraus vorliegenden Seismogramme lassen keine Störungsversätze in der Zechsteinbasis erkennen.

86.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

86.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

86.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

86.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

86.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Im Deck- und Nebengebirge ist die Bildung von Störungen und Störungszonen im Zuge zukünftiger Kaltzeiten und im Ergebnis geologischer Prozesse wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP betrifft nur das Teilsystem Deck- und Nebengebirge und ist daher nur das entsprechende Teilsystem zu berücksichtigen.

Einwirkungen auf Initial-Barrieren: Das FEP bezieht sich nur auf Deck- und Nebengebirge.

86.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Diapirismus

Subrosion

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Diapirismus, Vollständige Inlandvereisung, Inlandvereisung in randlicher Lage: Durch Salzbewegung, Gletschervorstoß/Gletscherrückzug und schwindende Eisauflast können die Bildung von Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge ermöglicht oder bestehende reaktiviert werden.

Deck- und Nebengebirge: Die Lagerungsverhältnisse des Deck- und Nebengebirges haben Einfluss auf eine Bildung von Störungen.

Subrosion: Beim Einsturz subrosionsbedingter Hohlräume oder der Bildung von Subrosionssenken ist lokal die Bildung von Störungen möglich.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Permeabilität

Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Matrixdiffusion

Begründungen:

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Deck- und Nebengebirge: Die Lagerungsverhältnisse der Deckgebirgsschichten werden verändert.

Dadurch kann sich die Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge ändern. Vorher getrennte Grundwasserleiter können miteinander verbunden oder die Störungszonen als Ausbreitungspfade genutzt werden.

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Störungen bilden Wegsamkeiten für Gasströmungen.

Permeabilität: Störungen stellen mögliche Transportpfade für Grundwässer dar. Matrixdiffusion: Eine Matrixdiffusion kann entlang der Störungsflächen stattfinden.

86.11 Offene Fragen

Keine.

86.12 Literaturquellen

Bornemann, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen. - BfS-Schriften, 4/91: 67 S.; Salzgitter.

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen geologischen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72: 201 S.; Hannover.

Marschall, R., Neumann, R. (1984): DZ-Bericht - Gorleben 1984 - über die Salzstockunterschließung im Konzessionsgebiet Gorleben. Erstellt im Auftrag der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE) .- Prakla-Seismos GmbH, Bericht 840 005 51: 17 S.; Hannover.

Zirngast, M. (1991a): Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben. - Ergebnisse einer strukturgeologischen Bearbeitung.- Geol. Jb., A 132: 3-31; Hannover.

Zirngast, M. (1991b): Strukturgeologie der Umgebung des Salzstocks Gorleben. - BGR, Ber., 109027: 57 S.; Hannover.

Zirngast, M. (1996): The development of the Gorleben salt dome (northwest Germany) based on quantitative analysis of peripheral sinks. (In: Alsop, G. I.; Blundell, D. J., Davison, I. (eds.): Salt Tectonics). - Geol. Soc. Sp. Publ., No. 100: 203-226; London.

Zirngast, M. (2004): Randsenkenanalyse des Salzstocks Rambow. - BGR, Ber., 0124291: 10 S.; Hannover.

Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht. - BGR, Ber.: 570 S.; Hannover.

Zwirner, R., Zirngast, M., Köthe, A. (2004): Der Aufbau des Deckgebirges und die Strukturentwicklung des Salzstocks Gorleben. Z. geol. Wiss., Berlin 32 (2004) 5/6: 327-351, 12 Abb., 2 Tab.

Weiterführende Literatur:

Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71: 147 S.; Hannover.

87 Spannungsänderung und Spannungumlagerung (2.2.06.01)

87.1 Definition/Kurzbeschreibung

Spannungsänderungen beschreiben eine Erhöhung oder Erniedrigung des Beanspruchungszustandes in einem Gebirgs- oder Tragwerksbereich ohne irreversible Deformationen. Spannungumlagerungen hingegen sind Spannungsausgleichsprozesse begleitet von irreversiblen Deformationen zwischen unterschiedlich hoch beanspruchten Tragwerksbereichen mit einem daraus folgenden Spannungsabbau in den höchstbeanspruchten Bereichen und einer gleichzeitigen Erhöhung der Spannung in weniger beanspruchten Bereichen des Tragsystems.

87.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Im unverritzten Salzgebirge liegt normalerweise ein isotroper Primärspannungszustand vor, der durch die Auffahrung der Grubenbaue gestört wird. Durch die Auffahrung der Grubenbaue stellt sich an der Hohlraumkontur ein deviatorischer Spannungszustand ein. Durch das visko-elastisch-plastische Materialverhalten des Salinars wird sich der deviatorische Spannungszustand an der Hohlraumkontur abbauen. In Abhängigkeit vom Betrag des Spannungsdeviators und den Festigkeitseigenschaften des Salinars können sich die Spannungen entweder bruchlos, d. h. ohne Überschreiten der Dilatanzgrenze, ausschließlich durch Konvergenz abbauen. In diesem Fall verlaufen die Deformationen volumentreu und rissfrei. Anderenfalls sind auch Dilatanz- oder Festigkeitsüberschreitungen denkbar, so dass die Spannungumlagerungen mit dilatanten Verformungen bzw. der Ausbildung einer Auflockerungszone verbunden sind.

Im Steinsalz kann es aufgrund seines Rekristallisationsvermögens auch zur Schädigungsverheilung kommen. In Bereichen, in denen stützender Versatz oder geotechnische Barrieren eingebaut sind, führt die Konvergenz zu einem Stützdruckaufbau in ggf. geschädigten Konturbereichen, so dass Risse geschlossen werden und über längere Zeiträume auch verheilen. Spannungumlagerungen kommen im Salinar zum Stillstand, wenn konvergenzbedingt wieder ein isotroper Spannungszustand vorherrscht.

In elastisch-plastischen Gesteinen führen Spannungskonzentrationen z. B. infolge einer Auffahrung erst dann zu Spannungumlagerungen in weniger beanspruchte Ge-

birgsbereiche, wenn zuvor Tragwerksbereiche überbeansprucht und daher plastifiziert worden sind. Wird die Festigkeit des Gesteins dagegen nicht überschritten, finden lediglich Spannungsänderungen statt.

87.3 Sachlage am Standort

Wie die Erfahrungen im Erkundungsbergwerk Gorleben zeigen, werden bei der Auffahrung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks Sekundärspannungen an der Hohlraumkontur auftreten, die zu dilatanten Verformungen und somit zu Spannungsumlagerungen unter Ausbildung einer Auflockerungszone (vgl. hierzu das FEP Auflockerungszone) mit Rissen führen werden. Außerdem wird es an der Kontur zu konvergenzbedingten Verformungen kommen.

Der teufenabhängige Gebirgsdruck bestimmt den sich nach der Auffahrung an der Hohlraumkontur einstellenden Sekundärspannungszustand, welcher in der geomechanischen Modellierung des Tragsystems zu berücksichtigen ist. Zur Bestimmung der Standort-spezifischen Gegebenheiten wurde mit der Auffahrung des Erkundungsberges ein umfangreiches untertägliches Messprogramm begonnen, das Messungen im Bereich der zwei Schächte, des Infrastrukturbereichs und des EB1 umfasst (Bräuer et al. 2011). Neben dem primären Spannungszustand werden dabei auch zeitliche Änderungen infolge auftretender Spannungsumlagerungen bestimmt. Als Verfahren kommen als Kurzzeitmessungen das BGR-Überbohrverfahren und das Hydrofrac-Messungen sowie für die Langzeitüberwachung Spannungsmonitorstationen zum Einsatz. Mit den Messungen in den Schächten wurde nachgewiesen, dass der primäre Spannungszustand annähernd dem lithostatischen Teufendruck mit einer mittleren Auflast von $2,1 \text{ t/m}^3$ (untere Grenze) bzw. $2,3 \text{ t/m}^3$ (obere Grenze) entspricht, wobei ein nahezu isotroper Spannungszustand vorherrscht. Die Maximalspannungen sind immer horizontal und die kleinsten vertikal orientiert. Die in den Schächten 1 und 2 installierten Monitorstationen weisen zumeist Spannungen zwischen 2 und 5 MPa aus, wobei Schwankungen im jahreszeitlichen Verlauf entsprechend der Temperaturschwankungen auftreten.

Durch die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges wird es zur thermischen Expansion bzw. bei der späteren Abkühlung zur Kontraktion des Gebirges kommen. Dabei werden Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge auftreten. Weiterhin sind während

der Nachverschlussphase mögliche Beanspruchungen des Gebirges und der geotechnischen Bauwerke durch den Fluiddruck zu berücksichtigen. Spannungsänderungen im Salzgebirge werden sich in Zukunft u. a. durch geänderte Auflasten (z. B. Gletscherüberföhrung, Sedimentation, Erosion) oder tektonische Prozesse (z. B. Diapirismus) ergeben (Mrugalla 2011). Die Bewertung dieser Vorgänge hat modelltechnisch auf Basis von geotechnischer Simulationsrechnungen zu erfolgen (z. B. Minkley et al. 2010).

87.4 Standortspezifische Auswirkungen

Der teufenabhängige Gebirgsdruck bestimmt den sich nach der Aufföhrung an der Hohlraumkontur einstellenden Sekundärspannungszustand, welcher in der geomechanischen Modellierung des Tragsystems sowie für die Bewertung der Barrierenintegrität der technischen Verschlussbauwerke zu berücksichtigen ist. Er bestimmt gleichzeitig die Ausbildung und Rückbildung der konturnahen Auflockerungszone.

Der Wärmeeintrag ins Gebirge aus dem radioaktiven Zerfall der Abfälle bzw. die spätere Abkühlung führt zu zusätzlichen, weitreichenden Spannungsveränderungen in der geologischen Barriere (z. B. am Kontakt Steinsalz/Hauptanhydrit) und in den Einlagerungsbereichen, wodurch neben Spannungumlagerungen auch lokale Schädigungsprozesse ausgelöst werden können. Die Bewertung der Spannungszustände erfolgt im Rahmen der geotechnischen Nachweise der Integrität anhand des Dilatanz- und Minimalspannungskriterium (Minkley et al. 2010). Neben der Beeinflussung konvergenzbedingter Verformungsprozesse wirken thermo-mechanische Spannungen auch auf die Integrität von Verschlussbauwerken oder Behältern. Dies wird u. a. bei der Auslegung von Behältern und technischen Barrieren berücksichtigt.

Die Änderung des Fluiddrucks führt neben den anderen genannten Beanspruchungen ebenfalls zu einer Änderung der Spannungen im Grubengebäude und somit zu Spannungumlagerungen.

87.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

87.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

87.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

87.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein, Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Brennelement-Behälter

87.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen sind eine (zeitlich veränderliche) Randbedingung.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP in den Teilsystemen "Nahfeld", "Strecken und Schächte" sowie "Wirtsgestein" zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Durch die Auffahrung des Grubengebäudes des Endlagers wird es zu Spannungsumlagerungen und Spannungsänderungen im Gebirge und somit zu Einwirkungen auf die Funktion der Initial-Barriere "Wirtsgestein" kommen. Auf die Strecken- und Schachtverschlüsse wirken die Spannungsumlagerungen und Spannungsänderungen nur indirekt über die Konvergenz.

87.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Erdbeben
Sedimentation
Diapirismus
Transgression oder Regression
Inlandvereisung in randlicher Lage
Vollständige Inlandvereisung
Glaziale Rinnenbildung
Thermische Expansion oder Kontraktion

Begründungen:

Erdbeben: Erdbeben können Spannungskonzentrationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten induzieren.

Sedimentation: Sedimentation bestimmt die Überlagerungshöhe und somit den Grundspannungszustand im Wirtsgestein.

Diapirismus: während des halokinetisch bedingten Salzaufstieges werden sich im Bereich von Materialinhomogenitäten oder bei lokal unterschiedlichen Verformungsraten Spannungen aufbauen.

Transgression oder Regression: Der Grundspannungszustand im Wirtsgestein wird von Transgression bzw. Regression über mechanische Auflast oder Entlastung beeinflusst.

Inlandvereisungen (vollständig bzw. Randlage) bedingen Veränderungen der Auflast an der Oberfläche, die sich in die Tiefe hin fortpflanzt.

Thermisch bedingte Expansion oder Kontraktion: Die Erwärmung des Salinars durch die wärmeentwickelnden Abfälle sowie die anschließende Abkühlung induzieren Spannungsänderungen bzw. Spannungsumlagerungen.

Glaziale Rinnenbildung: Änderung der Auflast infolge Erosion im Deckgebirge.

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Verschlussmaterial

Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Sonstige Verschlussbauwerke

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Fluiddruck

Salzgruskompaktion

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Quellen des Bentonits

Wirtsgestein

Deck- und Nebengebirge

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Brennelement- und sonstige Behälter: Die Behältermaterialien- bzw. Eigenschaften (z. B. Steifigkeit) beeinflussen die Spannungsumlagerungsrate in der Salinarkontur.

Versatz: Die Versatzeigenschaften (z. B. Steifigkeit) beeinflussen die Spannungsumlagerungsrate in der Salinarkontur.

Verschlussmaterial, Schacht- und Streckenverschlüsse, Inventar: Sonstige Stoffe: Die Eigenschaften (z. B. Steifigkeit) der Verschlussmaterialien und Bohrlochverfüllungen

sowie die Verschlusskonstruktion für Strecken und Schächte beeinflussen die Spannungsumlagerungsrate in der Salinarkontur.

Technische Einrichtungen: Ein Streckenausbau (Technische Einrichtung) beeinflusst die Gebirgsspannungen.

Bohrlochverrohrung, Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Die Bohrlochverrohrung übt einen Stützdruck auf das Gebirge aus und beeinflusst so die Spannungen. Wenn die Verrohrung ausfällt, ist der Stützdruck geringer.

Konvergenz: Konvergenz und Spannungsänderungen bzw. Spannungsumlagerungen beeinflussen sich wechselseitig.

Fluiddruck: Ein wirkender Fluiddruck führt zu einer Abminderung der vorliegenden Gebirgsspannungen (Effektiv-Spannungskonzept).

Salzgruskompaktion: Durch die Kompaktion des Versatzes werden in der Regel seine Eigenschaften, wie die Steifigkeit beeinflusst, was unmittelbar Auswirkungen auf die Spannungsumlagerungsrate hat.

Vorzeitiges Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses: Das Versagen führt zu einer lokalen Entlastung der betroffenen Komponenten bzw. Umgebung.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien wie z. B. das Quellen von Verschlusselementen führen lokal zu Spannungsänderungen bzw. Umlagerungen.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: Die Lageverschiebung des Schachtverschlusses bzw. von Elementen des Schachtverschlusses kann lokal zu Steifigkeitsänderungen im betrachteten Verfüllabschnitt und damit zu Spannungsänderungen- bzw. Umlagerungen führen.

Quellen des Bentonits: Das Quellen des Bentonits führt zu einer Druckerhöhung auf die Salinarkontur und damit zu Spannungsänderungen- bzw. Umlagerungen.

Wirtsgestein: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins, wie das prinzipielle Materialverhalten (elasto-plastisch oder viskoelasto-plastisch) oder die Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeit beeinflussen die Spannungsänderungs- bzw. Spannungsumlagerungsprozesse.

Deck- und Nebengebirge: Die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges, wie zum Beispiel die Dichte, beeinflussen den Grundspannungszustand im Wirtsgestein.

Die thermochemische Sulfatreduktion führt zu einer Volumenzunahme und bewirkt somit lokal eine Erhöhung der Gebirgsspannung.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Bildung kryogener Klüfte

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versagen eines Brennelement-Behälters

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Verschlussmaterial Schachtverschlüsse

Streckenverschlüsse

Sonstige Verschlussbauwerke

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Konvergenz

Salzgruskompaktion

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Ausfall eines Dichtpfropfens

Quellen des Bentonits

Auflösung und Ausfällung

Auflockerungszone Wirtsgestein

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Begründungen:

Kryogene Klüfte: Die mutmaßlich thermomechanisch entstandenen kryogenen Klüfte hängen in ihrer Entstehung und Ausbildung von den vorherrschenden Spannungsrandbedingungen (z. B. Teufendruck) ab.

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Die Gebirgsspannungen beeinflussen mögliche Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen.

Brennelement- und sonstige Behälter: Der Spannungsaufbau im Behälter wird durch die im Umfeld wirkenden Spannungsänderungen und Spannungumlagerungen (übertragen über den Versatzdruck) beeinflusst.

Versagen oder Ausfall eines Brennelement- bzw. sonstigen Behälters: das Versagen kann durch zu hohe Spannungen induziert werden.

Verschlussmaterial: Die Spannungsverhältnisse im Gebirge wirken sich direkt auf die Verschlussmaterialien aus.

Schacht- und Streckenverschlüsse: die Funktionsfähigkeit eines Verschlusses hängt wesentlich von den Spannungsrandbedingungen ab (z. B. Minimalspannungskriterium, mechanische Auslegung).

Technische Einrichtungen, Bohrlochverrohrung: Technischen Einrichtungen (z. B. Streckenausbauten) und Bohrlochverrohrungen werden durch die Gebirgsspannungen beeinflusst.

Ausfall einer Bohrlochverrohrung: Falls die Gebirgsspannungen, die bei der Auslegung zugrunde gelegten Spannungen überschreiten, können sich zum Ausfall einer Bohrlochverrohrung führen.

Konvergenz: die durch die Hohlräumeauffahrungen ausgelösten Spannungsänderungen beeinflussen die Konvergenz.

Salzgruskomaktion: Die Rate der Versatzkomaktion wird durch die Konvergenz und damit indirekt durch die Spannungsänderungen- bzw. Spannungumlagerungen im Wirtsgestein beeinflusst.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien. die Größenordnung der Volumenänderungen hängt wesentlich von der Einspannung bzw. den Spannungsrandbedingungen ab.

Vorzeitiges Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses: ein Versagen kann bei Überschreitung eines Spannungskriteriums induziert werden.

Lageverschiebung des Schachtverschlusses: die mechanische Integrität bzw. Position des Schachtverschlusses hängt u. a. von seiner mechanischen Einspannung ab.

Quellen des Bentonits: das Quellen des Bentonits hängt von seiner Einspannung ab, d. h. wenn der Quelldruck die Einspannung überschreitet, kommt es zu einer Volumenexpansion.

Aufösung und Ausfällung. Die Lösungskapazität hängt von den Spannungsrandbedingungen ab, z. B. kann eine Entlastung ein Ausfällen bewirken, allerdings gibt es auch mechanische Spannungskorrosion.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Die Eigenschaften der Klüfte im Wirtsgestein können durch Spannungsänderungen- bzw. Umlagerungen beeinflusst werden. Beispiele sind Permeabilitätserhöhung bei spannungsbedingten Festigkeitsüberschreitungen oder Permeabilitätsverringern infolge von Verheilung.

Auflockerungszone: Spannungsumlagerungen im Spannungsraum oberhalb der Dilatanzgrenze sind mit dilatanten Verformungen und damit mittelbar mit der Ausbildung einer Auflockerungszone verbunden, aber nicht alle Spannungen führen zu einer ALZ .

Wirtsgestein: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins werden durch die Spannungsänderungen- bzw. Umlagerungen beeinflusst.

Druckgetrieben Infiltration: die Höhe der kleinsten Hauptspannung im Gebirge bestimmt die Fluidinfiltration.

87.11 Offene Fragen

Keine.

87.12 Literaturquellen

Bräuer, V., Eickemeier, R., Eisenburger, D., Grisseman, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., Weber, J. R. (2011): Description of the Gorleben Site. - Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. BGR Hannover, 176 S.

Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. BMBF-Projekt FKZ 02C1264. - Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG): 214 S.; Leipzig.

Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Weiterführende Literatur:

Lux, K.-H. (2002): Gutachten im Auftrag des AkEnd, „Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften Teil A und B" sowie „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten". - TU Clausthal.

Lux, K.-H., Eberth, S., Düsterloh, U. (2006): Forschungsvorhaben: Weiterentwicklung eines Prognosemodells zum Barrierenintegritäts- und Langzeitsicherheitsnachweis für Untertagedeponien mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung und Schädigungsverteilung auf der Grundlage der Continuum-Damage-Theorie. - BMBF-Forschungsvorhaben 02C0720, TU Clausthal.

88 Selbstversatz (2.2.06.02)

88.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Selbstversatz wird das Auffüllen eines untertägigen Hohlraums mit hereinbrechendem Gestein des hohlraumnahen Gebirges verstanden.

88.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Auf die an der Hohlraumkontur und im angrenzenden Gebirge wirkenden Spannungen reagiert das Gestein entsprechend seinen Materialeigenschaften mit bruchlosen Kriechverformungen und, nach Überschreiten der Dilatanz-Grenze, mit bruchhaften Deformationen. Durch diese Prozesse werden Hohlräume im Wirtsgestein verschlossen. Bei bruchhaften Deformationen fallen aus dem konturnahen Gebirge abgeschaltete Bruchkörper in den Hohlraum. Das mit Haufwerk gefüllte Volumen vergrößert sich. Dieser Prozess wird Selbstversatz genannt.

88.3 Sachlage am Standort

Ein Grundprinzip des Endlagerkonzeptes ist die Hohlraum-Minimierung. Die größeren Hohlräume im Infrastrukturbereich werden durch einen Ausbau (Anker) stabilisiert. Zudem werden vor der Schließung des Endlagers alle untertägigen Hohlräume mit Salzgrus bzw. die Infrastrukturbereiche der Einlagerungs- und der Erkundungssohle mit Schotter versetzt, um die geologische Barriere zu stabilisieren. Durch die genannten Maßnahmen werden Abschaltungen an der Streckenkontur verhindert, so dass es zu keinem Selbstversatz durch in den Hohlraum hereinbrechendes Gestein kommen kann.

Falls es in den schachtnahen Bereichen durch den Zutritt von ungesättigten Deckgebirgslösungen zu Auslaugungen kommt, so werden die entstandenen Hohlräume durch den im Grubengebäude vorhandenen Fluiddruck stabilisiert. Auch in diesem Fall ist daher kein Selbstversatz zu erwarten.

88.4 Standortspezifische Auswirkungen

Keine. Entsprechend dem Schließungskonzept wird das Grubengebäude komplett mit Salzgrus oder Schotter (Infrastrukturbereich, Füllort, Schächte) verfüllt.

88.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

88.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit:

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

88.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

88.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

88.9 Begründungen

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Entsprechend dem Schließungskonzept wird das Grubengebäude komplett mit Salzgrus oder Schotter verfüllt. Kommt es zu Auslaugungen im Gebirge, so wird der geschaffene Hohlraum durch den Fluiddruck im Grubengebäude stabilisiert. Daher ist das FEP nicht zu betrachten.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren und Wirkung in den Teilsystemen:
Da das FEP "nicht zu betrachten" ist, ist es weder für die Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren noch für die Wirkung in den Teilsystemen zu berücksichtigen.

88.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

88.11 Offene Fragen

Keine.

88.12 Literaturquellen

Keine.

89 Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

89.1 Definition/Kurzbeschreibung

Fluide sind natürlich vorkommende Bestandteile eines salinaren Wirtsgesteins. Bei der Bildung von Evaporit-Mineralen werden Fluide in Abhängigkeit von der Kristallisationsgeschwindigkeit und den Sedimentations- bzw. Diagenesebedingungen in die Minerale selbst eingebaut sowie an den Korngrenzen bzw. in den Porenräumen oder in Klüften gespeichert.

Kohlenwasserstoffe werden im FEP Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein behandelt.

89.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Zechstein-Evaporite bilden sich durch Eindunstung von Meerwasser. Im Verlaufe der Kristallisation der einzelnen Salzminerale werden Lösungen und/oder Gase in die Salze eingeschlossen. Aufgrund postsedimentärer Prozesse (Diagenese, Salzstockbildung) können die Lösungen bzw. Gase mobilisiert, d. h. innerhalb der Salzlagerstätte umverteilt und dabei stofflich verändert werden. Beim Auffahren eines Bergwerks werden im Salzgebirge Lösungen in Form von Feuchtstellen, Tropfstellen oder Zulaufstellen angetroffen. Einen weiteren Typ von Fluidvorkommen stellen μm bis mm große Lösungseinschlüsse (fluid inclusions) dar. Sie können intrakristallin oder interkristallin (an Korngrenzen gebunden) vorkommen. Ihr Stoffbestand ist identisch mit primären Meerwasserrestlösungen oder sekundär gebildeten metamorphen Lösungen.

Über den Chemismus der Fluide können genetische Fragestellungen wie Herkunft, Migrationsweg und relatives Alter der Lösungen geklärt werden. Die dabei gewonnenen Informationen sind für die Beurteilung der Betriebssicherheit und der langzeitlichen Entwicklung des Endlagerbergwerkes von großer Bedeutung. Darüber hinaus ist die stoffliche Charakterisierung von Zutrittslösungen eine wichtige Grundlage für die Konzeptentwicklung des Barrierensystems im Umfeld des Einlagerungsbereiches.

89.3 Sachlage am Standort

Im Salzstock Gorleben wurden im Verlaufe der über- und untertägigen Erkundung an mehreren Lokalitäten Lösungsvorkommen festgestellt, chemisch analysiert und detailliert dokumentiert (BfS 2002). Die bis zum Beginn des Erkundungsstopps im September 2000 insgesamt festgestellten 666 m³ Lösung (Schramm et al. 2009) sind nicht beliebig im Salzstock verteilt, sondern an bestimmte stratigraphische Horizonte mit einer dafür geeigneten mineralogischen Zusammensetzung und strukturellen Ausbildung gebunden.

Bei der bisherigen Erkundung des Standortes Gorleben wurden Lösungs- und Gaszutritte hauptsächlich in den anhydritischen Gesteinen der Leine-Folge angetroffen, in denen kluft- oder schichtgebundene Speicherräume möglich sind. Die größten Lösungsvolumina sind aus der Gorleben-Bank (z3OSM) mit insgesamt 261 m³ und aus dem Hauptanhydrit (z3HA) mit insgesamt 250 m³ zugetreten (BfS 2002). Weitaus geringere Lösungsmengen kommen aus dem Anhydritmittelsalz (z3AM; ca. 3 m³) sowie aus dem Bank-/Bändersalz (z3BK/BD; 0,006 m³). An der Grenze z2/z3 wurden etwa 40 m³ festgestellt. Mischlösungen, d. h. Lösungen die nicht eindeutig nur einer lithologischen Einheit zugeordnet werden können oder deren Herkunft auch technogen sein kann, umfassen ein Gesamtvolumen von ca. 85 m³. Eindeutig technische Lösungen wurden im Verlaufe der bisherigen Erkundung des Salzstockes in einem Gesamtvolumen von ca. 26 m³ nachgewiesen. Lediglich ca. 1 m³ Lösung kann aufgrund unvollständiger Analysendaten stratigraphisch nicht eindeutig zugeordnet werden. Im Staßfurt-Hauptsalz, das durch halokinetisch bedingte Deformation, Verheilung und Homogenisierung gekennzeichnet ist, kommen nur sehr geringe Mengen an interkristallin gebundenen, dispers verteilten Fluiden vor. Die Wassergehalte schwanken zwischen 0,012 bis 0,017 Gew.- % (Bornemann et al. 2004, Schramm et al. 2009).

Die angetroffenen Lösungen stehen unter petrostatischem Druck, was eine Verbindung zu den über dem Salzstock befindlichen Aquiferen ausschließt (Nowak et al. 2002). Das im Ergebnis von Druckaufbau-Messungen rechnerisch ermittelte Volumen der bisher bei der Erkundung des Salzstockes Gorleben angetroffenen Reservoirs beträgt zwischen wenigen cm³ im Hauptsalz (z2) und maximal 5.100 m³ in einem Bereich der Gorleben-Bank (Nowak et al. 2002).

Alle im Erkundungsbergwerk (ohne Schächte) und in den Tiefbohrungen vorkommenden Lösungen sind an Halit gesättigt. Darüber hinaus sind die aus dem Hauptanhydrit

(z3HA) zutretenden Lösungen an Carnallit und teilweise an Kieserit oder Bischofit bzw. Sylvin gesättigt. Die Lösungen der Gorleben-Bank (z3OSM) weisen Carnallit-+/-Kieserit-Sättigung auf. An der Grenze z2/z3 kommen Lösungen vor, die an Carnallit + Kieserit oder Bischofit bzw. Kieserit gesättigt sind. Im Anhydritmittelsalz (z3AM) kommen an Kieserit gesättigte Lösungen und im z3BK/BD an Carnallit gesättigte Lösungen vor. Diese salzstockinternen Lösungen sind entweder durch Mischung primärer Meerwasserrestlösung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder aus der Reaktion von Kalisalzen mit NaCl-gesättigten Lösungen entstanden. Anhand charakteristischer geochemischer Signaturen konnte nachgewiesen werden, dass ein Teil der Lösungen im Verlaufe der salzstockinternen Migration mit Schichtsilikaten und/oder Karbonaten (Grauer Salzton, Leine-Karbonat) reagierten. Salzstock-externe Lösungen wurden im Verlaufe der bisherigen Erkundung im Salzstock Gorleben nicht nachgewiesen (Schramm et al. 2009).

Alle in den Schächten beprobten Lösungen sind NaCl-gesättigt und meistens infolge bergbaulicher Maßnahmen (Bewetterung) beeinflusst. Untergeordnet kommen in den Schächten auch Lösungen vor, die zusätzlich an Sylvin (nur Schacht 2) oder an Carnallit gesättigt sind. Diese salzstockinternen Lösungen werden als nicht bergbaulich beeinflusst interpretiert. Sie sind im Verlaufe der Migration durch Mischung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder Wechselwirkung mit dem umgebenden Gestein verändert worden (Schramm et al. 2009).

Schließt man Lösungen aus, die durch Bewetterung und bergbauliche Aktivitäten beeinflusst wurden, kommen im Salzstock Gorleben nur saline Lösungen vor, die reduzierende Bedingungen aufweisen. Die pH-Werte wurden nicht gemessen, können aber als kleiner 7 angenommen werden.

Vom Zechstein 2-Hauptsalz sind Lösungszutritte nur als Feuchtstellen, z. T. ohne erkennbare Zutrittspunkte bekannt. Die Zutrittsmengen liegen in der Größenordnung von wenigen Litern. Meist waren die Zutrittsvolumina zu gering für eine Beprobung und chemische Analyse.

89.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Fluide können ggf. nach Zutritt ins Grubengebäude zur Korrosion von Endlagerbehältern und anderen technischen Einrichtungen beitragen. Der Chemismus der Lösun-

gen ist für das chemische Umfeld von Abschlussbauwerken, Behältern, etc. und die Ausbreitung von Radionukliden in wässriger Lösung von Bedeutung.

89.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

89.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

89.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

89.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein

89.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Das Vorkommen von Fluiden im Wirtsgestein ist gewiss. Das FEP ist als Randbedingung und als wahrscheinlich einzustufen.

Wirkung in den Teilsystemen: Mobilisierte Fluide haben Auswirkungen auf die Prozesse im Wirtsgestein.

Einwirkungen auf Initial-Barrieren: Wo vernetzte Fluidvorkommen vorhanden sind, ist eine zumindest partielle Durchströmbarkeit des Wirtsgesteins möglich. Im Einlagerungsbereich des Hauptsalzes sind nur geringe Vorkommen im Wesentlichen als intra- und interkristalline Einschlüsse (Gebirgsfeuchte) vorhanden. Da die Fluidvorkommen unter dem Einfluss der wärmeerzeugenden Abfälle u.U. mobilisiert werden, ergibt sich über die Korrosion eine indirekte Einwirkung auf die Barriere Brennelement-Behälter.

89.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Begründungen:

Das Wirtsgestein enthält immer eine gewisse Menge Fluide. Bestandteile des Wirtsgesteins, die nicht eigens ausgewiesen werden.

Beeinflussende FEP:

Radiolyse

Auflockerungszone

Wirtsgestein

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Thermomigration

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Auflockerungszone: Die Ausbildung der ALZ beeinflusst die Mobilisierung und damit das Vorkommen bzw. die Verteilung von Fluiden in der Gesteinsstruktur.

Radiolyse: Fluide im Wirtsgestein, die sich im Einflussbereich der radioaktiven Abfälle befinden, können durch Gamma-Strahlung radiolytisch verändert werden.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Klüfte im Wirtsgestein sind potenzielle Lösungsreservoirs und können bis zu ihrer, durch Kriechprozesse oder Mineralisationen hervorgerufenen Verheilung den mobilisierten Lösungen als Transportwege dienen.

Thermomigration: Im Temperaturfeld der wärmeerzeugenden Abfälle sind Fluide unter entsprechenden Randbedingungen mobilisierbar.

Thermochemische Sulfatreduktion: Durch die thermochemische Sulfatreduktion entsteht als Reaktionsprodukt Wasser.

Wirtsgestein: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen Art und Menge der Fluidvorkommen.

Bemerkungen:

Auflockerungszone gehört per Definition nicht zum Wirtsgestein.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Gasmenge im Grubenbau

Radiolyse

Wirtsgestein

Thermomigration

Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Gasmenge im Grubenbau: Art und Menge der Gase im Grubenbau können durch Fluide aus dem Wirtsgestein verändert werden.

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Art und Menge der Lösungen im Grubenbau können durch Fluide aus dem Wirtsgestein verändert werden.

Thermomigration: Im Temperaturfeld der wärmeerzeugenden Abfälle wandern Fluideinschlüsse unter bestimmten Randbedingungen auf die Abfälle zu oder von ihnen fort.

Wirtsgestein: Evtl. Mobilisierung von Fluiden kann kleinräumige Änderungen im Mineralbestand des Wirtsgesteins hervorrufen.

Radiolyse: Wenn Fluide mobilisiert werden und in den Bereich von Radionukliden gelangen, kann Radiolyse stattfinden.

Thermochemische Sulfatreduktion: Durch Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein (fluid inclusions) kann die thermochemische Sulfatreduktion ausgelöst werden.

Bemerkungen:

Die chemische Zusammensetzung der Fluide beeinflusst das Quellen des Bentonits und das chemische Milieu im Grubenbau erst nach Zutreten von Lösungen ins Grubengebäude (indirekte Abhängigkeiten).

89.11 Offene Fragen

Im Wirtsgestein Steinsalz liegen als Folge der sedimentären Genese im Intergranularraum immer lokale Lösungseinschlüsse und Laugenfilme vor, die kapillare Sperrdruckeffekte bedingen können. Art und Umfang dieser Laugenfilme sind in diesem Zusammenhang zu klären.

89.12 Literaturquellen

BfS (2002): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung: Datenerfassung bis 30.09.2000. - Bundesamt für Strahlenschutz, Ber.: 1183 S.; Salzgitter.

Bornemann, O., Behlau, J., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2004): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Abschlussbericht zum AP G 412110000. - BGR, Ber.: 222 S.; Hannover.

Nowak, T., Weber, J. R. & Bornemann, O. (2002): Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben. - BGR, Ber.: 122 S.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars.- Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Herrmann, A. G. (1987): Gase in marinen Evaporiten. - Univ. Clausthal-Zellerfeld, Inst. f. Miner. und mineral. Rohst., Ber. : 137 S; Clausthal-Zellerfeld.

Herrmann, A. G., Knipping, B. (1993): Waste Disposal and Evaporites; contributions to long-term safety. - 193 S.; Berlin (Springer).

Herrmann, A. G., Rühle, S. (1995): Lösungseinschlüsse in Zechsteinevaporiten - Neue Perspektiven in der anwendungsorientierten Grundlagenforschung. - Kali u. Steinsalz, Bd. 11, H. 10: 345-354; Essen.

Herrmann, A. G., Siewers, U., Harazim, B., Lodziak, J., Weck, H.-D., Straßburg, S. (2000): Die Herkunft von Haupt-, Neben- und Spurenelementen in Salzlösungen der Zechsteinevaporite Mittel- und Norddeutschlands. - Kali und Steinsalz, 13: 771-783; Essen.

Herrmann, A. G., Von Borstel, L. E. (1991): The composition and origin of fluid inclusions in Zechstein evaporites of Germany. - N. Jb. Miner. Mh., Jg. 1991, H. 6: 263-269; Stuttgart.

Schramm, M., Kühnlenz, T., Mingerzahn, G., Hammer, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. - BGR, Ber.: 160 S.; Hannover.

90 Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.02)

90.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Kohlenwasserstoffe (KW) wird eine Stoffgruppe bezeichnet, die aus natürlichen organischen Verbindungen besteht, deren molekulare Strukturen (C_mH_n) sich überwiegend aus den chemischen Elementen Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) zusammensetzen.

Kohlenwasserstoffe sind Teil des natürlichen Stoffbestandes des Wirtsgesteins. In Salinalgesteinen werden KW meist auf Korngrenzen oder in Anhydritklüften angetroffen.

90.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die in der Natur vorkommenden KW liegen üblicherweise als Stoffgemische von gesättigten und ungesättigten offenkettigen bzw. zyklischen oder aromatischen KW sowie Terpenen und Terpenoiden vor. Zu den gesättigten KW zählen die durch C-C- und C-H-Einfachbindungen gekennzeichnete Gruppe der Alkane (C_nH_{2n+2}), deren einfachster Vertreter das Methan (CH_4) ist, sowie die Gruppe der Cycloalkane (C_nH_{2n}) mit Cyclopropan (C_3H_6) als einfachstem Vertreter. Alkane sind die Hauptbestandteile natürlicher Erdöl- und Erdgasvorkommen.

Zu den ungesättigten KW zählen die durch eine C=C-Doppelbindung (eine σ - und eine π -Bindung) gekennzeichnete Gruppe der Alkene (C_nH_{2n}), deren einfachster Vertreter das Ethen (C_2H_4) ist, sowie die Gruppe der Cycloalkene (C_nH_{2n-2}) mit Cyclopropen (C_3H_4) als einfachstem Vertreter. Ebenfalls zu den ungesättigten KW zählt die durch eine C-C-Dreifachbindung gekennzeichnete Gruppe der Alkine (C_nH_{2n-2}), deren einfachster Vertreter das Ethin (C_2H_2) ist.

Aromatische KW stellen cyclische KW mit konjugierten C-C-Doppelbindungen und mindestens einem Ringsystem, meist auf Basis des Benzols - C_6H_6 dar. Eine Untergruppe der Aromaten sind die polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), mit Naphthalin ($C_{10}H_8$) als einfachstem Vertreter, sowie Heteroverbindungen, die neben Kohlenstoff und Wasserstoff auch andere Elemente enthalten, wie z. B. O, N, S, P (Fox & Whitesell 1995). In Abhängigkeit von der Größe und der Struktur eines KW-Moleküls weisen die KW unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften auf. Unter

Normalbedingungen (bei 1 Bar und 25 Grad Celsius) sind Alkane mit weniger als fünf Kohlenstoffatomen gasförmig, mit 5 bis 17 Kohlenstoffatomen flüssig und mit mehr als 17 Kohlenstoffatomen fest. Flüssige Gemische von KW können auch langkettige KW mit mehr als 17 Kohlenstoffatomen oder Aromate enthalten. Die Zündtemperatur gasförmiger KW liegt unter Normbedingungen oberhalb von 400 Grad Celsius, der Flammpunkt unterhalb von -50 Grad Celsius.

Werden Bestandteile der Flora und Fauna von Sediment bedeckt und im Ergebnis nachfolgender Sedimentablagerungen in die Tiefe versenkt, so können aus diesen organischen Überresten bei entsprechenden p/T-Bedingungen Kohle, Erdöl bzw. Erdgas entstehen. Aufgrund ihrer geringen Dichten haben flüssige und gasförmige KW das Bestreben, das Muttergestein zu verlassen und über Trennflächen (z. B. Klüfte, Störungen, Auflockerungszonen etc.) und Porensysteme in hangende Gesteinsschichten zu migrieren. In sogenannten Speichergesteinen (Gesteine mit einem hohen Porenvolumen) reichern sich die migrierten KW an, sofern das potenzielle Speichergestein von einer abdichtend wirkenden Schicht (z. B. Salz oder Ton) versiegelt wird. In einer derartigen Fallenstruktur kann es zur Bildung einer Erdöl- bzw. Erdgaslagerstätte kommen. Viele der bekannten Erdöl- und Erdgaslagerstätten sind an das Umfeld von Salzstrukturen, insbesondere an Gesteinsschichten unterhalb der Salzstocküberhänge gebunden, was auf die sehr geringe Durchlässigkeit bzw. die gute Dichtwirkung des Steinsalzes zurückgeführt werden kann. Eine direkte Einlagerung von Kohlenwasserstoffen in Salzschichten findet im Verlaufe der Salzabscheidungsprozesse in der Regel nur untergeordnet statt. Lediglich in den liegenden karbonatischen bzw. tonig-karbonatischen Schichten sowie in sehr späten Ausfällungsprodukten von Salinarzyklen (Kaliflöze) werden z. T. erhöhte KW-Konzentrationen beobachtet. Im Zuge halokinetischer Prozesse können sich in Salzgesteinen temporär und lokal begrenzt Wegsamkeiten ausbilden, die es KW ermöglichen, in das Steinsalz zu migrieren. Das hohe Kriechvermögen des Salzes führt in kurzer Zeit dazu, dass sich diese Wegsamkeiten schließen, wodurch die KW im Steinsalz eingeschlossen werden. KW Vorkommen wurden z. B. in Sigmundshall, Bergmannsegen-Hugo, Siegfried-Giessen, Salzdetfurth, Niedersachsen-Riedel, Asse, Hattorf, Wintershall und Neuhof-Ellers beschrieben und untersucht (Gerling et al. 1991).

90.3 Sachlage am Standort

Gasförmige und flüssige KW gehören zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen. Die Verteilung von KW innerhalb von Salzlagerstätten gehorcht

strukturgeologischen, mit der Genese und dem internen Aufbau der Salzstruktur zusammenhängenden Gesetzmäßigkeiten. KW-Vorkommen wurden am Standort Gorleben in den Kluftspeichern der Salinargesteine der Leine-Folge (Hauptanhydrit, Gorleben-Bank und Anhydritmittelsalz) und in einigen Bereichen des Staßfurt-Hauptsalzes im Kernbereich des Hauptsattels festgestellt (Bornemann et al. 2008).

In den Schachtvorbohrungen Go 5001 und Go 5002 gab es Gaszutritte, die nicht quantifiziert wurden. In der Bohrung Go 5001 traten, über die Bohrung verteilt, etwa 5 m³ Kondensat zu. Weitere Vorkommen von KW wurden beim Auffahren des Infrastrukturbereichs sowie im Erkundungsbereich EB1 als nestartig angeordnete, jedoch volumenmäßig geringe Kondensatzutritte mit intensivem KW-Geruch in den Querschlägen 1 Ost und 1 West und beim Stoßen der Erkundungsbohrungen 02YER02 RB032, 02YEQ01 RB119, 02YEQ01 RB120 und 02YER20 RB500 angetroffen. Die Kondensatvorkommen in den Querschlägen des EB1 liegen isoliert voneinander im Bereich des ältesten Hauptsalzes (Knäuelsalz) bzw. in sehr geringer Anzahl im Bereich der unscharfen Grenze zwischen Knäuel- und Streifensalz. Weitere Vorkommen wurden im Bereich des Streifensalzes in den Bohrorten 1.2 und 3 an der S-Flanke des Hauptsalzsattels beobachtet (Bornemann et al. 2008).

Im Bereich des ältesten Hauptsalzes, im Knäuelsalz, wurden, bedingt durch die Auffahrung, am Stoß Kondensatflecken mit einer sichtbaren Verbreitung im Dezimeter- bis Meterbereich angetroffen. Die in Nestern, möglicherweise in Lagen und Bändern angeordneten Kondensatvorkommen besitzen in der Regel keine Verbindung untereinander. Die Abstände zwischen den Kondensatvorkommen liegen im Meter- bis 10-Meter-Bereich im westlichen Teil bzw. bis 100-Meter-Bereich im östlichen Teil des im Erkundungsbergwerk aufgeschlossenen Salzstockbereiches. Die Verteilung der, überwiegend an Korngrenzen gebundenen Kondensate, ist im EB1 sehr unregelmäßig und im restlichen Salzstock noch unbekannt.

Die im Salzstock Gorleben festgestellten Kondensate bestehen überwiegend aus niedrig siedenden flüssigen KW (C6 bis C16, meist kleiner C10), höhere Homologe kommen nur in vergleichsweise geringen Konzentrationen vor. Analysen der im Hauptsalz

im Bohrort 3.1 angetroffenen Kondensate ergaben 55,9 – 79,3 Vol.- % gesättigte KW; 5,8 – 10,8 Vol.- % aromatische KW; 1,6 – 2,1 Vol.- % Heteroverbindungen; 0,2 – 0,4 Vol.- % Asphaltene und zwischen 13 und 31 Vol.- % schwankende Abdampfverluste von leichtflüchtigen Verbindungen.

Mineralogisch-petrographische Untersuchungen an Dickschliffen aus dem Knäuelsalz (z2HS1) der Bohrungen RB 032 und RB 341 (Fischer 2000, Popp et al. 2002) weisen auf eine inhomogene Verteilung der KW entlang von Rissen und an Korngrenzen hin. Die von Fischer (2000) durchgeführte mikroskopische Bearbeitung von Kohlenwasserstoffführenden Proben aus dem Knäuelsalz (z2HS1) ergab Kondensatgehalte von 0,04 bis 250 ml/m³, wobei nur Flüssigkeitseinschlüsse bis zu einer Größe von 40 µm berücksichtigt wurden. Dies entspricht einem Volumenanteil von 0,02 bis 0,03 %. Weil mehr als 80 % der untersuchten Kondensat-Einschlüsse in Mineralkörnern, d. h. intrakristallin gebunden waren, ging Fischer (2000) davon aus, dass die ursprünglichen Kondensatgehalte, bedingt durch Fluidverluste während der Probenahme/aufbereitung, um das 5- bis 10-fache (0,1 – 0,2 %) höher sein können, zumal nach Herrmann & Knipping (1993) interkristalline Fluideinschlüsse bis zu 90 % aller im Salzgestein enthaltenen Einschlüsse ausmachen. Intrakristalline Gas- und Kondensateinschlüsse spielen nur eine untergeordnete Rolle. Die interkristallinen Einschlüsse sind bei Druckentlastung (z. B. Auflockerung des Gesteinsgefüges bei Auffahrung von Hohlräumen) und Temperaturerhöhung prinzipiell mobilisierbar.

Die bisher vorliegenden Gasgehaltsbestimmungen im Staßfurt-Steinsalz des Salzstockes Gorleben liegen mit weniger als 300 ppb im Bereich typischer Werte für das Zechstein 2-Hauptsalz (Gerling et al. 1991). Geringe Gasmengen wurden in den Knistersalzen des Kaliflözes nachgewiesen. Bei den Gasvorkommen handelt es sich im Wesentlichen um Einschlüsse von Stickstoff und kurzkettigen Kohlenwasserstoffen. Geochemische und isotopengeochemische Untersuchungen an Gasproben aus den Schächten und dem EB 1 zeigten, dass Methan den Hauptbestandteil der vorkommenden KW darstellt (Gerling et al. 1996), gefolgt von Ethan, Propan und höheren KW. Aufgrund der deltaC-13- und deltaD-Werte (Gerling et al. 1991, 1996; Schoell 1983) werden die meisten freien Gaszutritte als autochthone Zechsteinprodukte mit thermischer Überprägung (thermogenes Gas) und einem geringen Anteil bakteriellen Ursprungs (bakterielle Fermentation bzw. Reduktion) interpretiert, deren Quelle vermutlich die organische Substanz des Staßfurtkarbonats (z2SK) darstellt. Bei den salzgebundenen Gasen war bis Ende 2000 eine genetische Zuordnung in vielen Fällen nicht

eindeutig möglich, was wahrscheinlich auf unkontrollierte, partielle Gasverluste vor und während der Probenahme zurückzuführen ist.

Beim Auffahren neuer Grubenhohlräume in den Salzsichten der Leine-Folge könnten die überwiegend an anhydrithaltige Gesteine gebundenen, unter hohem Druck stehenden Lösungs- und Gasvorkommen freigesetzt werden (Bildung von Gasracheln bzw. Gasbläsern; Bornemann et al. 2008). Für den Fall, dass diese Vorkommen angebohrt werden, sind spezielle Sicherheitssysteme an den Bohrgeräten installiert (Preventer-Technik).

Der Salzstock Gorleben liegt über der Rotliegend Beckenfazies, die kein Speichergestein für Kohlenwasserstoffe darstellt, weshalb eine KW-Lagerstätte unter Gorleben nicht zu besorgen ist.

90.4 Standortspezifische Auswirkungen

Im Salzstock Gorleben wurden bis zum Erkundungsstopp im September 2000 nur geringe KW-Gehalte nachgewiesen. Eventuelle KW in den porösen Gesteinsschichten unterhalb des Salzstockes oder in den seitlich angrenzenden Sedimenten sind durch ausreichend mächtige undurchlässige Salzsichten vom Endlager isoliert und bleiben damit dauerhaft ohne Einfluss auf das Endlager. Insbesondere in den zahlreichen, das Hauptsalz der Staßfurt-Folge (geplantes Einlagerungsmedium) aufschließenden untertägigen Erkundungsbohrungen wurden nur lokal eng begrenzt KW-führende Bereiche nachgewiesen. Die Auswirkungen derartig geringer KW-Gehalte auf die geomechanischen Eigenschaften der Gesteine und das Verhalten der KW bei Wärmeabgabe durch die Abfälle werden derzeit detailliert untersucht. Die interkristallin gebundenen KW (Fluide) könnten infolge von Schädigungs- bzw. Auflockerungsprozessen des Gesteinsgefüges (Auffahrung von Hohlräumen, Wärmewirkung der Abfälle) freigesetzt werden, wobei die KW entlang der durch die Auflockerung entspannten Korngrenzen entweichen würden. Prinzipiell werden die möglichen Auswirkungen allerdings als sehr klein eingeschätzt (Weber et al. 2011). Die geomechanischen Auswirkungen dieser Prozesse auf die KW-führenden Wirtsgesteine werden in Weber et al. (2011) betrachtet.

Das Vorhandensein von KW ist eine der Voraussetzungen für den Ablauf der thermochemischen Sulfatreduktion.

90.5 Zeitliche Beschränkung

Natürliche und technogene Gesteinsdeformationen können ebenso wie die an die Abfalleinlagerung gebundenen Änderungen in den p/T-Bedingungen bzw. im Spannungszustand die im Gestein enthaltenen KW-Einschlüsse mobilisieren, in ihrer stofflichen Zusammensetzung verändern bzw. neue Reaktionsprodukte bilden. Diese Prozesse können kontinuierlich ablaufen und enden erst, wenn die im Gestein enthaltenen KW verbraucht oder die Bedingungen für derartige Prozesse nicht mehr gegeben sind.

90.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

90.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

90.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein

90.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: KW wurden als Bestandteile von Flüssigkeitseinschlüssen (fluid inclusions) und in Form von Gas- bzw. Kondensatzutritten im Salzstock Gorleben

bereits mehrfach nachgewiesen. Auch bei weiteren Auffahrungen ist im Hauptsalz mit lokal begrenzten Vorkommen von KW zu rechnen.

Wirkung in den Teilsystemen: Durch die Wärmeabgabe der Abfälle kann es zu Wechselwirkungen der KW mit dem Wirtsgestein und dem einzulagernden Material kommen. Dies führt möglicherweise zu Veränderungen des chemischen Milieus und des Spannungszustandes im Wirtsgestein selbst und im Nahfeld. Eventuelle Änderungen des Spannungszustandes könnten auch Einwirkungen auf Verschlussbauwerke haben.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: KW könnten im Falle deutlich erhöhter Konzentrationen ggf. Einfluss auf die Barrierenintegrität haben.

90.10 Direkte Anhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Bemerkungen:

Kohlenwasserstoffe sind natürliche Bestandteile der Salzgesteine. Das Wirtsgestein als auslösendes FEP wird nicht eigens aufgeführt. Vgl. beeinflussende und beeinflusste FEP.

Beeinflussende FEP:

Zersetzung von Organika

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Radiolyse

Auflockerungszone

Wirtsgestein

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein Thermochemische Sulfatreduktion

Begründungen:

Radiolyse: Die in unmittelbarer Umgebung der Abfälle vorliegenden KW können von Radiolyse betroffen sein.

Zersetzung von Organika: Die Möglichkeit einer Zersetzung von Organika infolge von Pyrolyse oder Radiolyse gilt auch für die KW-Vorkommen.

Auflockerungszone: Die Bildung einer Auflockerungszone führt zu einer Migration interkristalliner KW-Einschlüsse.

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock: Bei einigen mikrobiellen Prozessen werden Kohlenwasserstoffe abgebaut.

Thermochemische Sulfatreduktion: Durch die thermochemische Sulfatreduktion können Kohlenwasserstoffe abgebaut werden.

Wirtsgestein: Die Eigenschaften des Wirtsgesteins bestimmen Art und Menge der Kohlenwasserstoffe.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Störungen und Klüfte sind mögliche Migrationspfade für KW.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Zersetzung von Organika

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Gasmenge im Grubenbau

Radiolyse

Wirtsgestein

Thermochemische Sulfatreduktion

Kolloide

Begründungen:

Radiolyse: Die Menge an KW in unmittelbarer Umgebung der Abfälle bestimmt das Ausmaß der Radiolyse dieser Stoffe.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: In Bohrlöchern oder Strecken migrierende KW beeinflussen das geochemische Milieu im Grubenbau. Menge und Art der Kohlenwas-

serstoffe haben Einfluss auf die stattfindenden mikrobiellen Prozesse und sonstige Zersetzungsreaktionen.

Zersetzung von Organika: In Bohrlöchern oder Strecken migrierende KW beeinflussen das geochemische Milieu im Grubenbau. Menge und Art der Kohlenwasserstoffe haben Einfluss auf die stattfindenden mikrobiellen Prozesse und sonstige Zersetzungsreaktionen.

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock: In Bohrlöchern oder Strecken migrierende KW beeinflussen das geochemische Milieu im Grubenbau. Menge und Art der Kohlenwasserstoffe haben Einfluss auf die stattfindenden mikrobiellen Prozesse und sonstige Zersetzungsreaktionen.

Kolloide: Das Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen kann Einfluss auf die Bildung und Art von Kolloiden haben.

Gasmenge im Grubenbau: Gasförmige KW können aus dem Wirtsgestein in das Grubengebäude zutreten.

Wirtsgestein: Die KW können einen Einfluss auf die Barriereigenschaften des Wirtsgesteins haben.

Thermochemische Sulfatreduktion: Das Vorhandensein von KW ist eine der Voraussetzungen für den Ablauf der thermochemischen Sulfatreduktion.

90.11 Offene Fragen

Zur sicherheitstechnischen Bewertung von KW hinsichtlich der Betriebs- und Langzeitsicherheit sind ergänzende Untersuchungen zur räumlichen Verteilung, zu den Verteilungsgesetzmäßigkeiten, zur Zusammensetzung der KW und zu den Gehalten und Mengen der KW erforderlich. Diese Sachverhalte werden zurzeit durch die BGR, im Rahmen eines durch das BfS übergebenen Arbeitspaketes, erforscht.

Das Verhalten von KW bei Abfalleinlagerung bzw. Erhitzung insbesondere Prozesse wie Oxidation, Pyrolyse, Radiolyse und thermochemische Sulfatreduktion, sowie die Auswirkungen erhöhter KW-Gehalte auf die geomechanischen Eigenschaften der Salzgesteine sind ebenfalls zu erforschen.

90.12 Literaturquellen

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geol. Jb., C 73: 211 S.; Hannover.

Fischer, M. (2000): Gefügekundliche Untersuchung von Steinsalz im Hinblick auf die Verteilung und Bindungsform von Kohlenwasserstoffen und die Bestimmung des Volumenanteils der Kohlenwasserstoff-Einschlüsse. - Institut für Geowissenschaften, Universität Kiel, unveröff. Dipl.-Arbeit: 59 S.; Kiel.

Fox, M. A., Whitesell, J.K. (1995): Organische Chemie - Grundlagen, Mechanismen, bioorganische Anwendungen (Übersetzung aus dem Amerikanischen). - Spektrum Akademischer Verlag: 930 S.; Heidelberg.

Gerling, P., Beer, W., Bornemann, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. - Kali und Steinsalz, Bd. 10, Heft 11: 376-383; Essen (Glückauf).

Gerling, P., Faber, E., Bornemann, O. (1996): Gasproben aus den Schächten Gorleben 1 und 2 sowie EB 1. - Zwischenbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 7 S; Hannover .

Herrmann, A.G., Knipping, B. (1993): Fluide Komponenten als Teile des Stoffbestandes der Evaporite im Salzstock Gorleben - Vorkommen, Herkunft, Entstehung und Wechselwirkung mit den Salzgesteinen. - Bericht, TU Clausthal-Zellerfeld: 140 S.; Clausthal-Zellerfeld.

Popp, T., Fischer, M., Kern, H. (2002): Gefügekundliche Untersuchungen zur Verteilung von Kohlenwasserstoffen (KW) in Steinsalz. - Meyniana, Bd. 54: 131-154; Kiel.

Schoell, M. (1983): Geochemische Untersuchungen an Erdgasen und Kondensaten aus Bohrungen des Salzstocks Gorleben. - Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 29 S.; Hannover.

Weber, J.R., Hammer, J., Schulze, O. (2011): Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Projekt GE442800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover.

91 Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge (2.2.07.03)

91.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bewegung des Grundwassers im Deck- und Nebengebirge infolge der Schwerkraft. Das Grundwasser bewegt sich dabei von höheren zu niedrigeren Potenzialen.

91.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die hydrogeologische Situation des Norddeutschen Tieflandes ist geprägt durch die weichselzeitlich entstandenen Urstromtäler einerseits sowie die überwiegend aus kaltzeitlichen Schmelzwasserablagerungen und Möränenzügen aufgebauten Geestgebiete andererseits. Die überwiegend sandigen Böden der Geest weisen aufgrund hoher Infiltrationsraten sowie geringem Speichervermögen günstige Bedingungen zur Grundwasserneubildung auf. Dagegen sind für die Talauen negative Neubildungsraten kennzeichnend, weil aufgrund geringer Flurabstände des Grundwassers die Evaporitranspirationsraten über den Neubildungsraten liegen. Das Grundwasser fließt generell von den Höhen der Geest den Niederungen zu. Hier tritt der größte Teil neu gebildeten Grundwassers in die Vorfluter über. Nur ein sehr kleiner Teil trägt zu einem parallel zu den Flüssen gerichteten Grundwasserabfluss in den Talauen bei. Generell besteht im Norddeutschen Tiefland eine vertikale Zweiteilung in einen oberen gering mineralisierten Süßwasserkörper wechselnder Mächtigkeit und einen unteren Salzwasserkörper unterschiedlicher Mächtigkeit und Salinität. Die Salzwässer entstehen durch Salzablaugung an der Vielzahl der existierenden Salzstrukturen. Die größten Süßwassermächtigkeiten werden in den Geesthochlagen mit absteigender Grundwasserbewegung angetroffen, während die Süßwassermächtigkeiten in den Niederungsgebieten deutlich reduziert sind. Lokal sind die Grundwässer bis in den oberflächennahen Bereich versalzen und schränken die Möglichkeit der Nutzung ein. Dementsprechend weist eine von Grube et al. (2000) veröffentlichte Karte geogener Grundwasserversalzung in Norddeutschland das gesamte Elbe-Urstromtal als Zone „binnenländischer Versalzung“ des Grundwassers aus.

91.3 Sachlage am Standort

Die tertiären und quartären Deckschichten des Salzstocks Gorleben bilden ein bis zu maximal 430 m mächtiges System von Grundwasserleitern und -geringleitern. Wie im gesamten Norddeutschen Tiefland bildet die Oberfläche des Rupeltons (unteres Oligozän) die Basis des regionalen Fließsystems. Diese flächenhaft verbreiteten Tone trennen dieses oberflächennahe Fließsystem von den tiefen mesozoischen salinaren Aquiferen der Randsenken. Die darüber lagernden Unteren Braunkohlensande (Miozän) bilden einen bedeutenden überregional verbreiteten Grundwasserleiter, der in den Randsenken um den Salzstock durchgängig verbreitet ist, wohingegen er über dem Salzstock fehlt. Die Unteren Braunkohlensande werden vom gering durchlässigen Hamburg-Ton überlagert.

Prägendes Strukturelement im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben ist die Gorlebener Rinne. In ihrem zentralen Bereich über dem Salzstock wurde der Rupelton, der den Salzstock ursprünglich flächenhaft überdeckte, weitestgehend erodiert, so dass die gut durchlässigen unteren Elster-Rinnensande in einer Kontaktfläche von mehreren km² unmittelbar dem Hutgestein, lokal auch Zechsteinsalzen auflagern. Im Norden und Süden des Salzstocks Gorleben stehen die Sande mit den in den Randsenken verbreiteten Unteren Braunkohlensanden in hydraulischem Kontakt. Die elsterzeitlichen Rinnensande werden vom gering durchlässigen Lauenburger-Ton-Komplex überlagert. Die insgesamt wesentlich inhomogenere, vertikal wie lateral stark gegliederten Schichtenfolge der weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen - ist im Ganzen gesehen - als heterogener Grundwasserleiter einzustufen (Klinge et al. 2007).

Hydrogeologisch ergibt sich eine Grobgliederung in einen oberen und einen unteren Grundwasserleiter. Untere Braunkohlensande und elsterzeitliche Rinnensande bilden einen im Norden und Süden des Salzstocks hydraulisch verbundenen unteren Aquifer, die weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen den oberen Aquifer. Beide Systeme werden durch die Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex getrennt. Die Trennschichten sind in der Gorlebener Rinne sowie nördlich der Elbe lückenlos verbreitet, während im Südosten und Nordwesten größere Verbreitungslücken bestehen, so dass beide Aquifere hier in direktem Kontakt stehen.

Bedingt durch die Lage im Elbe-Urstromtal weist die Geländeoberfläche im Gebiet von Gorleben gegenwärtig nur sehr geringe Höhenunterschiede auf. Die maximale Höhendifferenz zwischen den Dünenfeldern der Gartower Tannen im Süden des Salzstocks

mit einer Grundwasserneubildung von 160 mm/Jahr und der Elbniederung im Norden beträgt 15 m. Die entsprechende Höhendifferenz des Grundwasserspiegels liegt bei lediglich 6 m. Das oberflächennahe Grundwasser strömt mit geringem Gefälle von 1 bis 1,5 % radial von der Hochlage im Süden des Salzstocks in die umgebenden Senken ab.

Wie im gesamten Norddeutschen Tiefland besteht eine vertikale Zweiteilung in einen oberen gering mineralisierten Süßwasserkörper wechselnder Mächtigkeit und einen unteren Salzwasserkörper unterschiedlicher Salinität. Die größten Süßwassermächtigkeiten in den Geesthochlagen mit absteigender Grundwasserbewegung und Verbreitungslücken der Grundwasser-Geringleiter liegen bei etwa 150 m, während die Süßwassermächtigkeiten in den Niederungsgebieten bei wenigen Metern bis Zehnermetern liegen. Durch die Salzablaugung im Kontaktbereich zwischen Salinar und Rinnensedimenten im Zentrum der Gorlebener Rinne kommt es zu einer starken Aufsatzung der Grundwässer im unteren Rinnenaquifer bis zur Salzsättigung. Die Verbreitung dieser hochversalzten Solen ist nicht nur auf die Gorlebener Rinne begrenzt, sondern sie umfasst auch den zentralen Bereich der nordwestlichen Randsenke, deren unterer Aquifer mit den elsterzeitlichen Rinnensanden der Gorlebener Rinne hydraulisch verbunden ist. Dieses Verteilungsmuster ebenso wie spezielle Untersuchungen zur Süß-/Salzwasserbewegung im unteren Rinnenaquifer lassen auf einen Salzwassertransport aus der Rinne in den unteren Aquifer der nordwestlichen Randsenke schließen. Aufgrund der höheren Dichte des Salzwassers sammeln sich diese im Zentrum der Randsenke, ohne dass ein wesentlicher Austrag in oberflächennahe Aquifere erfolgt. Lokale oberflächennahe Salzwasservorkommen über der Gorlebener Rinne lassen darüber hinaus auf einen direkten vertikalen Salzwasseraufstieg aus dem unteren Rinnenaquifer aufgrund von Verbreitungslücken des Lauenburger Ton-Komplexes schließen (Klinge et al. 2007). Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit der Salinargesteine bilden sich Salzstrukturen durch Zonen erhöhter Temperaturen im Grundwasser des Deckgebirges ab. Die gemessenen Temperaturen über dem Salzstock Gorleben übersteigen örtlich 19 °C; sie liegen damit um 9 °C über dem Temperaturniveau in den Randsenken. Das existierende Fließsystem des tiefen Aquifers wird durch Dichteunterschiede modifiziert, die wirbelförmige Strömungsmuster bedingen (Klinge et al. 2007: Kap. 9.2). Die über den zentralen Bereichen des Salzstocks zu erwartenden höheren Grundwassertemperaturen beeinflussen das Fließsystem in nur geringem Maße, da mit den höheren Temperaturen keine wesentlichen Dichteänderungen verbunden sind.

91.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Das derzeitige Fließsystem ist durch geringe Druckgradienten einerseits sowie hohe hydraulische Leitfähigkeiten der Grundwasserleiter andererseits charakterisiert. Anhand von Modellrechnungen für ein gegebenes Einlagerungskonzept lässt sich abschätzen, dass die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle zu einer Temperaturerhöhung am Salzspiegel führen würde (Nipp et al. 2000). Die Temperaturerhöhung wirkt sich auf die Löslichkeit von Steinsalz und die Dichte der Porenwässer aus. Allerdings ist die Temperaturabhängigkeit der NaCl-Löslichkeit in Wasser sehr gering. Nach Weast & Astle (1982) steigt diese bei einer Temperaturerhöhung von 16 °C um lediglich 1,5 %. Eine substantielle Beeinflussung der Ablaugungsraten aufgrund der Temperaturerhöhung ist somit nicht gegeben.

Zudem führt diese Temperaturerhöhung zu einer Erniedrigung der Wasserdichte. Es stellt sich ein Dichtegefälle zwischen kalten oberflächennahen Grundwässern und warmen Grundwässern im Kontaktbereich zum Salinar ein, das möglicherweise eine vertikal nach oben gerichtete konvektive Wasserbewegung induzieren könnte. Allerdings liegen die Dichteunterschiede bei lediglich 0,7 %. Einer möglichen Überprägung des bestehenden Fließsystems durch eine solche vertikale Konvektion stehen zudem zwei wesentliche Faktoren entgegen:

a) Über dem Salzstock besteht eine ausgeprägte Salinitätsschichtung mit einem oberen Süßwasserkörper und hochversalzten bis salzgesättigten Solen im Kontaktbereich zum Salinar, deren Dichte um etwa 20 % höher als die Dichte von Süßwässern liegt. Im Vergleich zu diesen hohen Dichtedifferenzen sind die Dichteunterschiede aufgrund des zu erwartenden Temperaturgefälles von untergeordneter Bedeutung.

b) Die bestehende ausgeprägte vertikale Gliederung in einen unteren und einen oberen Aquifer erschwert bzw. verhindert a priori einen Wasseraustausch zwischen beiden Wasserleitern.

Innerhalb des unteren Aquifers der Gorlebener Rinne, der im zentralen Bereich des Salzstocks direkten Kontakt mit dem Hutgestein hat, steigt der Salzgehalt von etwa 30 g/l bis auf Werte über 300 g/l an dessen Basis an, dementsprechend besteht eine ausgeprägte Dichteschichtung innerhalb dieses Aquifers (Klinge et al. 2007). Modellrechnungen zur Süß-/Salzwasserbewegung innerhalb der Rinne lassen sich dahingehend interpretieren, dass gegenwärtig ein nordostwärts gerichteter Salzwasseraustrag aus der Rinne erfolgt. Es ist nicht zu erwarten, dass die marginalen Dichteänderungen

aufgrund der zu erwartenden Temperaturerhöhungen das bestehende Fließsystem in der Gorlebener Rinne beeinflussen.

Vergleichsweise geringe Veränderungen des gegenwärtigen Oberflächenreliefs auf Grund zukünftiger kaltzeitlicher Prozesse können starke Veränderungen des Fließsystems bewirken. Die Auswirkungen einer zukünftigen Kaltzeit sind daher im Einzelnen schwer abzuschätzen. Hydraulische Modellrechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen auf das Fließsystem haben gezeigt, dass es beispielsweise – abhängig von der Wahl der Randbedingungen – zu einer Umkehr der Fließrichtung innerhalb der Gorlebener Rinne kommen kann (Boulton et al. 2001).

91.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

91.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

91.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

91.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

91.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Grundwasserströmung ist als Randbedingung gewiss.

Wirkung in den Teilsystemen: Grundwasser ist nur im Deck- und Nebengebirge vorhanden, das Teilsystem wird berücksichtigt. Da sich der Schacht auch im Deckgebirge befindet, ist das Teilsystem Strecken und Schächte ebenfalls zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Eine indirekte Beeinträchtigung auf die Funktion der Initial-Barriere „Wirtsgestein“ ergibt sich durch die Subrosion, deren Ausmaß u. a. durch die Grundwasserströmung und -mineralisation gesteuert wird. Darüber hinaus ist das mit der Grundwasserbewegung verknüpfte hydraulische Potenzial im Umfeld der Schächte bei der Dimensionierung der Schachtabschlüsse zu berücksichtigen.

91.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Globale klimatische Veränderungen

Transgression oder Regression

Permafrost

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Glaziale Rinnenbildung

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Permeabilität

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Wärmeproduktion

Deck- und Nebengebirge

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges

Topografie

Oberflächengewässer

Begründungen:

Globale klimatische Veränderungen, Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung, Glaziale Rinnenbildung, Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge, Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges, Topografie, Oberflächengewässer: Die hydraulischen Verhältnisse und damit die Grundwasserströmung werden durch Klima-FEP (Niederschlag, etc.) und durch FEP beeinflusst, die die morphologisch-strukturellen Verhältnisse (Relief, Störungen) bzw. deren Änderungen (glazigene Rinnen) beschreiben.

Transgression oder Regression: Durch eine Transgression wird das bestehende hydraulische Druckpotential und damit das Strömungssystem beeinflusst.

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Die Wegsamkeiten können zwei durch wenig permeable Schichten getrennte Grundwasserleiter miteinander verbinden.

Permeabilität: Die sich aus der Gesteinszusammensetzung ergebende Permeabilität beeinflussen die Grundwasserströmung und -fließrichtung.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Strömungsvorgänge im Grubengebäude können die Grundwasserströmung im Deckgebirge lokal beeinflussen, wenn aus dem Endlagerbergwerk über die Schächte salzgesättigte Lösungen in das Deckgebirge austreten.

Deck- und Nebengebirge: Aufbau und Lagerungsverhältnisse des Deck- und Nebengebirges sind verantwortlich für eine Grundwasserströmung.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Temperaturverhältnisse und die Mineralisation des Grundwassers sowie die im Grundwasser gelösten bzw. ungelösten Gase beeinflussen die Grundwasserströmung und -fließrichtung.

Bemerkungen:

Das FEP Wärmeproduktion wird nicht aufgenommen, da Dichteunterschiede eine höhere Wirkung auf das Fließsystem als Temperatureinflüsse aufweisen.

Resultierende FEP:

Advektion

Begründungen:

Advektion: Mit dem sich bewegenden Grundwasser ist ein Stofftransport verbunden.

Beeinflusste FEP:

Subrosion

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Oberflächengewässer

Diffusion

Matrixdiffusion

Begründungen:

Subrosion: Durch Salzlösung im Kontaktbereich zwischen Grundwässern und Salinar am Salzspiegel bilden sich Salzwässer. Art und Umfang der Grundwasserströmung steuert den Abtransport der Salzwässer und damit die Subrosion am Salzspiegel.

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Grundwasserströmung hat Einfluss auf die Antriebsmechanismen für die Radionuklidmigration. Sie steuert den Abtransport gelöster Salze aber auch den der gasförmigen Radionuklide, die aus dem Endlager über die Schächte in das Grundwasser gelangen.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Durch die mit dem Grundwasserfluss transportierten im Wasser gelösten Stoffe werden die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge beeinflusst.

Oberflächengewässer: Die Grundwasserströmung im Deckgebirge steht in direkter Wechselwirkung mit den Oberflächengewässern; in den sommerlichen Trockenperioden wird der Abfluss der Gewässer ausschließlich aus Grundwasser gespeist.

Diffusion, Matrixdiffusion: Wenn sich durch die Grundwasserströmung Konzentrationsunterschiede zwischen gelösten Stoffen ergeben, werden die Diffusionsprozesse beeinflusst.

91.11 Offene Fragen

Keine.

91.12 Literaturquellen

Boulton, G.S., Gustafson, G., Schelkes, K., Casanova, J., Moren, L. (2001): Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (Pagepa). Final report. - Office for Official Publications of the European Communities. Nuclear Science and Technology, EUR 19784 EN: 147 S.; Luxemburg.

Grube, A.T., Wichmann, K., Hahn, L., Nachtigall, K.H. (2000): Geogene Grundwasser- versalzung in den Poren-Grundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. - Technologiezentrum Wasser, 9: 203 S.; Karlsruhe.

Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71; Hannover.

Nipp, H.-K., Heusermann, S. (2000): Erkundungsbergwerk Gorleben, Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3). Ergebnisbericht. - BGR-Bericht: 45 S.; Hannover.

Weast, R.C., Astle, M.J. (1982): Handbook of Chemistry and Physics. - CRC Press, 62th Edition; Boca Raton/Florida.

92 Gasströmung im Deck- und Nebengebirge (2.2.07.04)

92.1 Definition/Kurzbeschreibung

In diesem FEP wird die Ausbreitung von Gasen im Deck- und Nebengebirge eines Endlagers beschrieben.

92.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Aus dem Endlager werden unter Umständen Gase in das Deckgebirge freigesetzt. Bei diesen Gasen handelt es sich vorwiegend um nicht radioaktive Gase wie im Endlager eingeschlossene, komprimierte Luft, oder Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan, die bei Korrosions- oder Degradationsprozessen entstehen. Die nichtaktiven Gase können als Transportmedium für radioaktive Gase fungieren. Der Transport von Radionukliden in der Gasphase wird im FEP Radionuklidtransport in der Gasphase behandelt.

92.3 Sachlage am Standort

Gase, die aus dem Endlager ins Deck- und Nebengebirge gelangen, werden entweder im Grundwasser gelöst oder über eine Zweiphasenströmung transportiert. Über längere Zeiträume ist zu erwarten, dass die nicht gelösten Gase in die Biosphäre bzw. Atmosphäre entweichen.

92.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die im Grundwasser gelösten Gase beeinflussen den Transport und Chemismus des Grundwassers. Einige der transportierten Gase werden sich umwandeln, z. B. auf Grund der sich ändernden chemischen Bedingungen (z. B. Karbonatgleichgewicht von CO₂) oder mikrobieller Tätigkeit (z. B. Methan in Kohlendioxid). Durch die Umwandlung kann sich ihre Löslichkeit im Grundwasser signifikant ändern.

Die nicht gelösten Gase steigen über den Zweiphasenfluss durch das Aquifersystem auf und gelangen letztendlich in die Biosphäre bzw. Atmosphäre. Dort ist der Beitrag gasförmiger radioaktiver Isotope bei der Ermittlung der Strahlenexposition zu berücksichtigen.

sichtigen (siehe FEP Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und Radionuklidtransport in der Gasphase).

92.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

92.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

92.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

92.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

92.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Auf Grund der Reduzierung der Hohlräume im Endlager ist es nicht auszuschließen, dass nicht alle eingeschlossenen und gebildeten Gase im Endlager gespeichert werden können. Es ist wahrscheinlich, dass Gase aus dem Endlager entweichen und im Deck- und Nebengebirge transportiert werden.

Wirkung in den Teilsystemen: Entsprechend der Definition des FEP wird der Prozess nur im Deckgebirge betrachtet.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Dieser FEP wirkt nur im Deckgebirge. Dieses ist jedoch keine Initial-Barriere.

92.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Porosität

Permeabilität

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Deck- und Nebengebirge

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges

Begründungen:

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Grundwasserströmung stellt mit der Gasströmung ein Zweiphasenflusssystem dar, in dem sich die Strömung beider Phasen gegenseitig beeinflusst.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die hydrochemischen Verhältnisse haben einen Einfluss darauf, ob die Gase im Grundwasser aufgelöst werden, oder ob sie im gasförmigen Zustand bleiben.

Porosität: Die Porosität bestimmt die durch ein Volumen durchströmende Menge.

Permeabilität: Die Permeabilität bestimmt den Strömungswiderstand und somit die Strömungsgeschwindigkeit.

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen können präferenzielle Fließpfade für die Gase darstellen.

Strömungsvorgänge im Grubenbau: Der resultierende Strom von Gasen aus dem Endlager bestimmt den Quellterm der in das Deckgebirge eintretenden Gase.

Deck- und Nebengebirge: Der Schichtaufbau des Deck und Nebengebirges bestimmt die Strömungsrichtungspfade.

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge: Störungen und Störungszonen stellen potenzielle präferenzielle Fließpfade dar.

Resultierende FEP:

Advektion

Begründungen:

Advektion: Durch die Freisetzung von Gasen in das Deckgebirge werden auch Stoffe transportiert.

Beeinflusste FEP:

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Diffusion

Begründungen:

Grundwasserströmung in der Geosphäre: Die Grundwasserströmung stellt mit der Gasströmung ein Zweiphasenflusssystem dar, in dem sich der Fluss beider Phasen gegenseitig beeinflusst.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die frei gesetzten Gase, können die hydrochemischen Verhältnisse im Deckgebirge verändern. Beispiele sind die Änderung des pH-Werts durch die Freisetzung von Kohlendioxid, oder die Änderung des Redox-Potentials durch die Freisetzung von Wasserstoff.

Diffusion: Durch die Freisetzung von Gasen in das Deckgebirge können auch Stoffe transportiert werden.

92.11 Offene Fragen

Es ist unklar, ob überhaupt Gase aus dem Endlager in das Deck- und Nebengebirge freigesetzt werden und wenn ja, über welchen Weg.

92.12 Literaturquellen

Becker, D.-A. , Buhmann, D., Mönig, J., Noseck, U., Rübel, A., Spießl, S. (2009): Endlager Morsleben: Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS. Gesellschaft für Reaktor- und Anlagensicherheit mbH, GRS-A-3454; Braunschweig.

93 Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge (2.2.08.01)

93.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die hydrochemischen Verhältnisse des Deck- und Nebengebirges sind bestimmt durch die Art und Menge der gelösten Stoffe, die Zusammensetzung der Gesteine und den sich daraus ergebenden chemisch-physikalischen Eigenschaften (pH, Eh) des Wassers.

93.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Hydrochemische Prozesse können sich verändern, wenn sich durch Erosion, Sedimentation oder im Zuge einer Meeresüberflutung (Transgression/Regression) andere Gebirgsbereiche durchströmt werden oder sich das strömende Medium anders zusammensetzt. Bei anderen Strömungswegen und Veränderung des strömenden Mediums können sich, z. B. über die Dichte des Grundwassers, auch die hydraulischen Verhältnisse ändern.

93.3 Sachlage am Standort

Im Aquifersystem des Deck- und Nebengebirges im Bereich des Salzstocks Gorleben besteht eine generelle vertikale Gliederung in einen oberen Süßwasserkörper mit überwiegend geringen Gesamtsalzgehalten und einen darunter liegenden Salzwasserkörper mit Salzgehalten von >1 g/L TDS (Total Dissolved Solids) bis zur Salzsättigung von etwa 320 g/L TDS. Dieser vertikalen Zweiteilung entspricht eine ebenfalls vertikale, von der Salinität abhängige Gliederung in chemische Wassertypen (Klinge et al. 2007). Bezogen auf die Hauptbestandteile der Wässer ergibt sich folgende Abfolge:

- Ca-SO₄-Wässer
- Ca-HCO₃-Wässer
- Na-HCO₃-Wässer
- Na-Cl-Wässer

Ca-SO₄-Wässer treten bevorzugt in den obersten zehn Metern innerhalb der kalkfreien bzw. entkalkten Sedimente der Dünengebiete auf. Wesentliche Verwitterungsreaktion in den Böden ist die hydrolytische Zersetzung von Feldspäten. Hierdurch bedingt sowie aufgrund des atmogenen Schwefelsäureeintrags sind Calcium und Sulfat die mit Abstand häufigsten Bestandteile der Sickerwässer. In den Geestgebieten führt der zur Tiefe hin ansteigende Kalkanteil in den Sedimenten zu steigenden Ca-HCO₃-Gehalten in den Grundwässern. Ca-HCO₃-Wässer bilden unterhalb von 25 m unter Gelände den dominierenden Wassertypus des Süßwasserkörpers.

Innerhalb des Süßwasserkörpers treten lokal Na-HCO₃-Wässer als ein weiterer Wassertypus auf. Diese Wässer entstehen beim Aussüßen ehemals salzwasserführender Grundwasserleiter. Durch Ionentausch zwischen Natrium-besetzten Tonmineralen und Ca-HCO₃-Wässern werden den Grundwässern in unterschiedlichem Maße Calcium-Ionen entzogen und entsprechende Anteile an Natrium in die Wässer freigesetzt. Die Grundwässer des Salzwasserkörpers zählen ohne Ausnahme zum Typus der Na-Cl-Wässer. Sie entstanden durch Salzablaugung (FEP Subrosion). Die ursprüngliche Zusammensetzung der Grundwässer wird durch geochemische Wechselwirkungen zwischen Grundwässern und Gesteinsmineralen (Alkalisierung und Erdalkalisierung) sowie mikrobielle Prozesse sekundär verändert. Die Alkalisierung der Grundwässer ist bedingt durch Ionenaustauschprozesse zwischen Süßwässern und Natrium-besetzten Tonmineralen. Hierdurch kommt es vor allem in gering mineralisierten Grundwässern zu einer Anreicherung von Natrium im Grundwasser und einer entsprechenden Abreicherung von Calcium und Magnesium. Solche Wässer treten gehäuft innerhalb des unteren Grundwasserleiters unmittelbar oberhalb der Süß-/Salzwassergrenze auf.

Im Gegensatz dazu führt die Erdalkalisierung aufgrund der Verwitterung von Feldspäten und Tonmineralen im Kontakt mit Salzwässern zur Anreicherung von Calcium, Magnesium und Strontium im Grundwasser. Salzwässer weisen daher ein Natriumdefizit bezogen auf Chlorid auf.

Praktisch alle Sedimente enthalten organische Substanzen in Form von Braunkohlelagen in den Unteren Braunkohlensanden oder von fein verteiltem Detritus aus aufgearbeiteten Braunkohlesanden in den Quartärsedimenten. Die mikrobielle Oxidation dieses organischen Kohlenstoffs beeinflusst die chemische Zusammensetzung der Grundwässer. Art und Umfang dieser Oxidation sind von der tiefenabhängigen Sauerstoffkonzentration im Grundwasser abhängig. In der oberflächennahen sauerstoffhaltigen Zone erfolgt die Kohlenstoffoxidation unter aeroben Bedingungen. Ein charakteris-

tischer Rückgang der Nitratgehalte der Grundwässer in Tiefen unterhalb der Grundwasseroberfläche markiert den Übergang vom aeroben zum anaeroben Milieu. Die anaerobe Kohlenstoffoxidation erfolgt zunächst durch Reduktion des Nitrats, in größeren Tiefen zunehmend durch Sulfatreduktion. Ein großer Teil der tieferen Grundwässer weist daher mehr oder weniger stark erniedrigte Sulfatgehalte auf. Anhand der Schwefelisotopenzusammensetzung des gelösten Sulfats kann indirekt geschlossen werden, dass mikrobielle Sulfatreduktion bis zu Gesamtlösungsinhalten von etwa 200 g/l auftritt (Klinge 1994).

93.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die hydrochemischen Verhältnisse können den Transport und die Rückhaltung von Radionukliden beeinflussen, indem sie auf das Sorptionsverhalten von Radionukliden einwirken. Erhöhte Fließ- und Transportraten unter Eisbedeckung können zur vertikalen Verlagerung der Süß-/Salzwassergrenze ebenso wie der Grenze zwischen oxischem und anoxischem Milieu führen und dadurch das Sorptionsvermögen von Gesteinspartikeln/-matrix beeinflussen. Durch die mögliche Umgestaltung des Deck- und Nebengebirges während zukünftiger Kaltzeiten kann es zu Ablagerung von Sedimenten mit einer anders gearteten chemischen Zusammensetzung kommen, was zu einer Änderung der hydrochemischen Verhältnisse führt.

Für die Langzeitbeständigkeit des oberen Dichtelements des Schachtverschlusses spielt die chemische Zusammensetzung des Grundwassers eine Rolle. Im Bereich des Hutgesteins und tiefer bis zum Salzspiegel wurden hochsaline bis salzgesättigte Lösungen festgestellt. Z. B. können Betonkonstruktionen in Abhängigkeit vom pH-Wert, von der Konzentration der Hydrogenkarbonat-, Ammonium-, Magnesium- und Sulfationen des Grundwassers angegriffen werden.

93.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

93.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

93.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

93.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

93.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Hydrochemische Reaktionen laufen im Deck- und Nebengebirge ab und sind als Randbedingung gewiss.

Wirkung in den Teilsystemen: Grundwasser ist im Deck- und Nebengebirge inklusive Hutgestein vorhanden und steht somit auch im Kontakt mit dem Wirtsgestein. Da das obere Dichtelement des Schachtverschlusses mit dem im Hutgestein vorkommenden Grundwasser in Kontakt treten kann, ist das Teilsystem Strecken und Schächte ebenfalls zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Eine indirekte Beeinträchtigung auf die Funktion der Initial-Barriere „Wirtsgestein“ ergibt sich durch die Subrosion, deren Ausmaß u. a. durch die Grundwasserströmung und -mineralisation gesteuert wird, bzw. auf die Initial-Barriere „Schachtverschlüsse“ über das FEP Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen.

93.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Deck- und Nebengebirge: Die Zusammensetzung der Schichten bestimmen die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge.

Beeinflussende FEP:

Erosion

Sedimentation

Diagenese

Subrosion

Transgression oder Regression

Permafrost

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Glaziale Rinnenbildung

Auflösung und Ausfällung

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge

Oberflächengewässer

Komplexbildung

Begründungen:

Erosion, Sedimentation, Diagenese, Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung, Glaziale Rinnenbildung, Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Gasströmung im Deck- und Nebengebirge, Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge: Die kaltzeitlichen FEP, die durch einen zukünftigen anders gearteten Schichtenaufbau ausgelösten Veränderungen der Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, die Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen sowie mikrobielle Prozesse beeinflussen die hydrochemischen Verhältnisse.

Auflösung und Ausfällung, Subrosion: Durch die Auflösung und Ausfällung von Stoffen sowie die Ablaugung von Salzgestein werden die hydrochemischen Verhältnisse beeinflusst.

Transgression oder Regression: Transgression kann zu einer Überdeckung des Standortes mit Meerwasser führen, was nach Salzwasserversickerung in den Untergrund eine Aufsalzung des Grundwassers nach sich zieht.

Oberflächengewässer: Durch das Versickern von Oberflächenwässern und den in ihnen gelösten Stoffen ändern sich die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge.

Komplexbildung: Durch die Bildung von Komplexverbindungen werden die hydrochemischen Verhältnisse beeinflusst.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Diagenese

Subrosion

Permafrost

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Auflösung und Ausfällung

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge

Sorption und Desorption

Kolloide

Komplexbildung

Begründungen:

Diagenese: Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers beeinflusst die diagenetischen Prozesse, indem z. B. Fällungsreaktionen stattfinden.

Subrosion: Die Subrosion hängt u. a. von der Sättigung des Grundwassers an Salzen ab.

Permafrost, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Das geochemische Milieu und die Salzkonzentration im Grundwasser haben einen Einfluss auf den Gefrier-

prozess während Permafrost-Zeiten und einen maßgeblichen Einfluss auf die Langzeitstabilität der Schacht- und Streckenverschlüsse.

Auflösung und Ausfällung: Das Ausmaß von Auflösung und -Ausfällung wird durch die hydrochemischen Verhältnisse bestimmt.

Sorption und Desorption, Kolloide, Komplexbildung: Wasser-Gestein-Wechselwirkungen (Sorption und Desorption) und geochemische Prozesse wie Kolloid- und Komplexbildung werden durch den Grundwasserchemismus gesteuert.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Gas- und Grundwasserströmung werden von den hydrochemischen Verhältnissen (z. B. Dichteunterschiede) beeinflusst und umgekehrt.

Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge: Mikrobielle Prozesse können bei sich ändernden hydrochemischen Verhältnissen beendet oder gefördert werden.

93.11 Offene Fragen

Keine.

93.12 Literaturquellen

Klinge, H. (1994): Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben und seiner Randsenken. Projektgebiet Gorleben-Süd. - BGR-Ber.: 234 S.; Hannover.

Klinge, H., Boehme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71: 147 S.; Hannover.

Klinge, H., Boehme, J., Ludwig, R. (1999): Fresh-water/salt-water distribution in the aquifer system above the Gorleben salt dome: results of the Gorleben site investigation programme. (In: Proc. 15th SWIM (Salt-Water Intrusion Meeting, Ghent, 25-29 May 1998). - Natuurwet. Tijdschr. (Flämish J. Nat. Sci.), Vol. 79: 172-177; Ghent/Belgien.

Klinge, H., Köthe, A., Ludwig, R.-R., Zirner, R. (2002): Geologie und Hydrogeologie des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben. - Z. Angew. Geol., 48. Jhrg., H. 2: 7-15; Hannover.

Klinge, H., Margane, A., Mrugalla, S., Schelkes, K., Söfner, B. (2001): Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes Dömitz-Lenzen. Ergebnisbericht. - BGR-Ber.: 344 S.; Hannover.

Klinge, H., Rübel, A., Suckow, A., Beushausen, M. (2000): Isotope hydrogeological studies on the salt water flow above the Gorleben salt dome. (In: Proc. 16th SWIM, Miedzzydroje-Wolin Island 2000). - Nicholas Copernicus University, Vol. 80: 95-102; Torun/Polen.

Klinge, H., Schelkes, K., Rübel, A., Suckow, A., Schildknecht, F., Ludwig, R. (2002): The Saltwater/Freshwater Regime in the Sedimentary Cover of the Gorleben Salt Dome. - Transport in Porous Media, Kluwer Academic Publishers, 47: 125-148; Dordrecht/Netherlands.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72: 201 S.; Hannover.

Zirngast, M., Zirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht. - BGR-Ber.; 570 S. Hannover.

94 Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge (2.2.09.01)

94.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses FEP umfasst die Gesamtheit der durch Mikroben verursachten Prozesse im Deck- und Nebengebirge außerhalb des Grubengebäudes.

94.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die biochemischen Prozesse beruhen auf den Mechanismen und der Steuerung des Stoffwechsels von Kleinstlebewesen und der daran beteiligten Stoffe im wässrigen Milieu. Mikroorganismen wie z. B. Bakterien werden in der Erdkruste an vielen Stellen gefunden, wo sie auch unter reduzierenden, sauerstofffreien Verhältnissen Energie durch den Abbau von chemischen Verbindungen gewinnen und davon leben können.

Sulfat reduzierende Bakterien existieren normalerweise bei Temperaturen bis < 60 bis 80 °C, obwohl hyperthermophile Sulfatreduzierer auch bei höheren Temperaturen von bis zu 110 °C in der Umgebung hydrothermalen Exhalationen auf bzw. in Tiefseeböden beobachtet wurden (Warren 2006). In Regionen mit der typischen geothermischen Tiefenstufe von 3 °C pro 100 m würde die "Normal"-Temperatur ein Leben der Bakterien in Tiefen bis ca. 2.000 – 2.500 m ermöglichen. Im Gipshut von Salzlagerstätten weisen vereinzelt vorkommende massige Kalzit- oder Schwefelvorkommen darauf hin, dass es an dieser Stelle zu mikrobiell bedingten Umsetzungen kam (Schneider et al. 1965), was z. B. aufgrund negativer C-13-Signaturen des Kalzits belegt werden kann.

94.3 Sachlage am Standort

Mikroorganismen sind im Grundwasser des Deck- und Nebengebirges in Abhängigkeit von den hydrochemischen Verhältnissen (vgl. FEP Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge) grundsätzlich vorhanden (z. B. Kuever et al. 2005), aber auch in den Strecken und Schächten sowie im Nahbereich anzutreffen. Mikrobielle Prozesse im Nahfeld sowie in den Strecken und Schächten werden im FEP Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock behandelt.

94.4 Standortspezifische Auswirkungen

Sulfatreduzierende Bakterien zeichnen sich dadurch aus, dass sie Sulfat zu Schwefelwasserstoff reduzieren, wobei organische Verbindungen oder anorganische Substanzen wie metallisches Eisen oder Wasserstoff oxidiert werden (Kuever et al. 2005).

Durch die Abbauprozesse von Mikroorganismen können das chemische Milieu bzw. die hydrochemischen Verhältnisse und die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine im Deck- und Nebengebirge (z. B. Konkretionsbildungen, Schwefelbildungen im Hutgestein) beeinflusst werden.

94.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

94.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

94.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

94.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

94.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Mikrobielle Prozesse finden im Deck- und Nebengebirge in Abhängigkeit vom chemischen Milieu statt und werden als „wahrscheinlich“ eingestuft.

Wirkung in den Teilsystemen: Eine Berücksichtigung der Teilsysteme Nahfeld, Strecken und Schächte und Wirtsgestein ist auf Grund der FEP-Definition auszuschließen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Mögliche Umsetzungen durch mikrobielle Prozesse im Grundwasser des Deck- und Nebengebirges haben auf die Funktion der Initial-Barriere „Wirtsgestein“ keine Auswirkung ("nicht zutreffend").

94.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Deck- und Nebengebirge, Hydrochemische Verhältnisse im Deck und Nebengebirge: Die chemischen Bestandteile der Grundwässer oder die Zusammensetzung der Sedimente beeinflussen die bakteriellen Aktivitäten.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Hydrochemische Verhältnisse im Deck und Nebengebirge: Durch den Stoffwechsel und die Stoffwechselprodukte der Bakterien wird die chemische Zusammensetzung des Grundwassers beeinflusst.

94.11 Offene Fragen

Keine.

94.12 Literaturquellen

Kuever, J., Rabenstein, A. (2005): Nachweis von sulfatreduzierenden Bakterien. (In: DGMK (Hrsg.): DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung des Fachbereichs Aufsuchung und Gewinnung am 28. und 29. April 2005 in Celle). - DGMK (Deutsche Wissensch. Ges. für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.), Fachber. Aufsuchung u. Gewinnung, Tagungsbericht 2005-1: 267-272; Hamburg.

Schneider, A., Nielsen, H. (1965): Zur Genese des elementaren Schwefels im Gips von Weenzen (Hils). - Zentrallaboratorium für die Geochemie der Isotope. Beiträge zur Mineralogie und Petrographie, 11: 705-718; Göttingen.

Warren, J.K. (2006): Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. - Springer Verlag: 1035 S.; Heidelberg.

Weiterführende Literatur:

Klinge, H. (1994): Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben und seiner Randsenken. Projektgebiet Gorleben-Süd. - BGR-Ber.: 234 S.; Hannover.

Machel, H.G. (2001): Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings - old and new insights. - Sed. Geol., 140: 143-175; Amsterdam.

95 Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges (2.2.10.01)

95.1 Definition/Kurzbeschreibung

Durch den Zerfall der Radionuklide in den Abfällen entwickelt sich Wärme, die eine Ausdehnung des Wirtsgesteins verursacht. Dadurch erfährt das Deckgebirge zunächst eine Hebung und nach Abklingen der Wärmeentwicklung aufgrund der Kontraktion des Wirtsgesteins eine Senkung.

95.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In diesem FEP ist explizit die Hebung und Senkung des Deckgebirges angesprochen. Nach dem Bundesberggesetz sind Schiefstellungen der Tagesoberfläche wegen der negativen Auswirkungen auf Gebäude über ein bestimmtes Maß hinaus unzulässig und zu vermeiden. Dies wird jedoch nicht im Rahmen der radiologischen Langzeitsicherheit betrachtet.

95.3 Sachlage am Standort

Das Gebiet oberhalb der Einlagerungsfelder liegt zurzeit auf etwa 25 m über NN und wird sich durch die Erwärmung entsprechend anheben bzw. mit der Abkühlung wieder absenken.

Abschätzende Rechnungen für den Standort Gorleben mit dem Kenntnisstand und den Planungen vor dem Moratorium (z. B. Nipp & Heusermann 2000), bei denen die Einlagerung von Brennstabkockillen (BSK) in 100 m tiefen Bohrlöchern des geplanten Einlagerungsniveaus untersucht wurden, lassen ab ca. 7.000 – 8.000 Jahre nach Einlagerungsbeginn eine Hebung im Maximum von bis zu ca. 4 m im Deckgebirge erwarten.

95.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Durch die thermisch bedingte Ausdehnung des Wirtsgesteins und die dadurch verursachte geringe Anhebung des Deckgebirges wird auch die Grenzfläche Deckgebirge -

Salzstock um diesen Betrag angehoben. Strukturelle Veränderungen wie Schichtverstellungen oder Störungen sind daraus nicht zu erwarten.

Übertägig können sich Änderungen im Verlauf der Fließgewässer mit einem verstärkten Einschneiden in den Untergrund ergeben oder es entstehen Trocken- bzw. Vernässungszonen. Die Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse werden aber wegen des kleinen Hebungsbetrages gering ausfallen.

Mit der Wärmeproduktion kommt es zu Spannungsänderungen am Salzspiegel, die im FEP Thermische Expansion oder Kontraktion behandelt werden.

95.5 Zeitliche Beschränkung

Die stärkste Wärmeentwicklung aus dem Zerfall der Radionuklide findet innerhalb der ersten hunderte von Jahren statt. Die daraus resultierende Hebung des Deckgebirges erfolgt in den ersten Tausenden von Jahren nach dem Beginn der Einlagerung. Die Senkung verläuft über einen längeren Zeitraum von einigen Zehntausend Jahren.

95.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

95.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

95.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

95.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Durch die Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle wird es zunächst zur Expansion und später nach Abklingen der Aufheizung zur Kontraktion des Wirtsgesteins kommen. Eine Auswirkung auf das überlagernde Deck- und Nebengebirge ist wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Das FEP ist auf Grund der Definition nur für das Teilsystem Deck- und Nebengebirge zu berücksichtigen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Eine Beeinträchtigung einer Initial-Barriere ergibt sich durch eine Hebung oder Senkung des Deckgebirges nicht.

95.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Thermische Expansion oder Kontraktion

Begründungen:

Thermische Expansion oder Kontraktion: Durch die Erwärmung erfolgen zunächst eine Ausdehnung des Salzgesteins und eine Anhebung der Deckgebirgsschichten. Die nachfolgende Gesteinsabkühlung führt zur Absenkung des Deckgebirges.

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Topografie

Begründungen:

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Gasströmung im Deck- und Nebengebirge, Topografie: Durch die Hebung oder Senkung des Deckgebirges oberhalb der Einlagerungsflächen ändert sich die lokale Oberflächengestalt und die strömungswirksamen hydraulischen Druckverhältnisse können verändert werden.

Bemerkungen:

Eine Beeinflussung des FEP Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge ist nicht gegeben, da die Anhebung des Deckgebirges gleichmäßig erfolgt und durch die Elastizität der unkonsolidierten Sedimentschichten kompensiert wird.

95.11 Offene Fragen

- Klärung offener Fragen aus dem Vergleich der mit zwei- und dreidimensionalen Modellen erzielten Ergebnisse.
- Neuere Modellrechnungen auf Grund neuer Erkundungsergebnisse.

Im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG, AP 9) werden neue Berechnungen unter Berücksichtigung verschiedener Endlagervarianten durchgeführt. Erste Ergebnisse bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse der früheren Berechnungen.

95.12 Literaturquellen

Nipp, H.-K., Heusermann, S. (2000): Erkundungsbergwerk Gorleben. Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3). Ergebnisbericht. - BGR-Ber.: 45 S.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Tholen, M., Hippler, J., Kreienmeyer, M., Krone, J. (2008): ISIBEL Abschlussbericht 'Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW'. AP7 'Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase'. - DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-16-2008-AP: 75 S.; Peine.

96 Thermomigration (2.2.10.02)

96.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Thermomigration wird die durch das Wärmefeld des Endlagers verursachte Migration von Lösungen im Salzgestein verstanden.

96.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die von den Abfällen ausgehende Wärme heizt den Versatz und das umgebende Salzgebirge auf. Im Temperaturgradienten können Lösungen im Salzgestein in Richtung der höheren Temperatur vordringen (Shefelbine 1982).

Lösungseinschlüsse (intrakristallines Wasser) bewegen sich nur, wenn ein Lösungsgradient über den Lösungseinschluss existiert. Treibende Kraft für den Transport vollständig mit Lösung gefüllter Einschlüsse ist die unterschiedliche Löslichkeit von NaCl mit der Temperatur und eine folgende Auflösung von NaCl auf der warmen und Ausfällung auf der kalten Seite des Lösungseinschlusses. Die Transportgeschwindigkeit ist abhängig vom Temperaturgradient und liegt in der Größenordnung von 1 cm/Jahr pro °C/cm (Olander 1984). Die Lösungseinschlüsse werden innerhalb weniger zehner Jahre aus den Salzkristallen auf die Korngrenzen transportiert. Der Weitertransport erfolgt dann wie für interkristallines Wasser.

Interkristallines Wasser auf den Korngrenzen wird an der Grenzfläche zwischen dem ungestörten Salzgestein und der Strecke oder dem Bohrloch beim Überschreiten einer Temperatur von 100° C verdampft. Auf Grund des Druckgradienten des Wasserdampfes wird der Wasserdampf in die Strecke abgeführt. Wird das Wasser in der Strecke durch Korrosion verbraucht, dann wird der Druckgradient aufrechterhalten und weiterhin Wasser im Salzgestein verdampft. Dadurch wandert die Grenzfläche (Verdampfungsfront) tiefer in das Salzgestein hinein (Hadley & Faris 1980). Der Prozess endet, sobald die Temperatur im Salzgestein unter 100 °C absinkt, oder der Wasserdampfdruck in der Strecke ansteigt. Dieser Prozess wurde in Labor- und in-situ Versuchen beobachtet. Unklar ist, ob und wie weit die Verdunstungsfront in das ungestörte Salzgestein vordringen kann. Ein weiterer Antrieb für den Transport von interkristallinem Wasser ist die thermische Ausdehnung des Wassers und des Salzgesteins. Beides führt zu einem Fluss von Wasser auf den Korngrenzen.

96.3 Sachlage am Standort

Das Salzgestein am Standort hat einen Wasseranteil von 0,012 - 0,017 Gew.- %, der auf Korngrenzen oder im Salzkristall in feinen Bläschen eingeschlossen ist und unter Gebirgsdruck steht.

Solange eine genügend hohe Temperatur vorliegt, ist eine Migration möglich. Das Temperaturmaximum aufgrund der Heizleistung der Abfälle im Gebirge wird innerhalb von Zehnerjahren erreicht. Nach einigen tausend Jahren ist die Ausprägung des FEP nur noch gering, da sich die Temperaturen in der Teufe des Einlagerungsbereiches dem Niveau des natürlichen Temperaturfeldes annähern.

96.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Wenn die migrierenden Lösungseinschlüsse in Kontakt mit den Abfallbehältern kommen, können sie deren Korrosion ermöglichen. Weiterhin sind Umkristallisationsprozesse von behälternahen Salzmineralien und Salzkrustenbildungen auf den Behältern möglich. Migrierende Lösungseinschlüsse können eine Thermochemische Sulfatreduktion bei entsprechenden Temperaturen $> 80\text{ °C}$ nach sich ziehen.

Feuchte verändert das mechanische Verhalten von aufgelockertem Steinsalz und Salzgrusversatz. Die Menge des durch diesen Prozess freisetzbaren Wassers ist aber nur gering und gegenüber einer Anwesenheit von Versatzfeuchte unbedeutend. Im Wirtsgestein werden keine Lösungen angereichert, sondern lediglich im begrenzten Umfang von einigen Zentimetern verlagert.

96.5 Zeitliche Beschränkung

Nur relevant bei großen Temperaturgradienten, also wahrscheinlich nicht mehr lange nach Erreichen des Temperaturmaximums im Gebirge in der Umgebung der Einlagerungsbehälter nach einigen 100 Jahren.

96.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

96.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

96.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

96.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Auf Grund der Wärmeentwicklung der Abfälle ein wahrscheinlicher Prozess.

Wirkung in den Teilsystemen: Relevant für das Wirtsgestein, aber auch für das Nahfeld sowie Strecken und Schächte (Thermomigration im Salzgrusversatz).

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Auf Grund des Prozesses ergibt sich eine Beeinträchtigung durch mehrere andere FEP, z. B. auf die Initial-Barriere „Brennelement-Behälter“ über möglicherweise erhöhte Lösungsmengen im Nahfeld und die dadurch mögliche Korrosion. Ein Einfluss über mehrere FEP wird als "nicht zutreffend" klassifiziert. Der Einfluss dieses Prozesses auf das Wirtsgestein beeinträchtigt es nicht in seiner Funktion als Barriere.

96.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Auflösung und Ausfällung
Wärmeproduktion
Auflockerungszone
Wirtsgestein
Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Begründungen:

Auflockerungszone: Die Risse der Auflockerungszone unterstützen die Migration von Lösungen.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein, Wirtsgestein: Im Wirtsgestein sind die Lösungseinschlüsse vorhanden.

Wärmeproduktion: Der Prozess kann bei entsprechend hohen Temperaturen, bzw. Temperaturgradienten stattfinden.

Auflösung und Ausfällung: Die Lösungsprozesse sind der treibende Mechanismus der Thermomigration von intrakristallinen Wassers.

Bemerkungen:

Eine Migration aus den Lösungseinschlüssen im Salzgrus wird nicht betrachtet, da diese Einschlüsse bereits bei der Versatzfeuchte berücksichtigt werden.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Lösungszutritt ins Grubengebäude
Wirtsgestein
Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Begründungen:

Lösungszutritt ins Grubengebäude: Durch die Migration der Lösungseinschlüsse wird die Menge der Lösungen im Grubenbau geringfügig erhöht.

Wirtsgestein: Ändert die Eigenschaften des Wirtsgesteins (wie z. B. dessen Kriechfähigkeit).

Bemerkungen:

Lösungen im Grubenbau und Metallkorrosion: Nur indirekt über den Lösungszutritt

Versatz: Änderungen der Versatzfeuchte indirekt über Lösungszutritt und Lösungen im Grubenbau. Die Lösungseinschlüsse im Versatz werden unter der Versatzfeuchte subsumiert und werden daher bereits berücksichtigt.

Konvergenz: Indirekt über die Änderung der Eigenschaften des Wirtsgesteins.

96.11 Offene Fragen

Es ist unklar, wie weit die Verdunstungsfront und damit der Prozess der Thermomigration in das intakte Salzgestein vordringen kann.

96.12 Literaturquellen

Hadley, G.R., Faris, G.W. (1980): Revised Theory of Water Transport in Rock Salt. - Sandia National Laboratories, SAND80-2398; Albuquerque.

Olander, D.R. (1984): A study of thermal-gradient-induced migration of brine inclusions in salt: Final report. - Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Mem. Inst., BMI/ONWI-538; Columbus/Ohio/USA.

Shelfbine, H.C. (1982): Brine Migration: A Summary Report. - Sandia National Laboratories, SAND82-0152; Albuquerque.

Weiterführende Literatur:

Schlich, M. (1986): Simulation der Bewegung von im natürlichen Steinsalz enthaltener Feuchte im Temperaturfeld. - Gesellschaft für Strahlen und Umweltforschung München, GSF-Bericht 2/86; Neuherberg.

97 Thermische Carnallitzerersetzung (2.2.10.03)

97.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Mineral Carnallit enthält sechs Moleküle Kristallwasser (40 Gew.-%), die es mit zunehmender Temperatur über verschiedene Hydratationsstufen abgibt.

97.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die thermodynamische Stabilität des Minerals Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ergibt sich über das Phasengleichgewicht zwischen dem mineralischen Festkörper, der gesättigten Salzlösung als flüssiger Phase über dem mineralischen Bodenkörper und dem Wasserdampf in der Gasphase (Wasserdampfpartialdruck) (Freyer et al. 2006).

Die thermische Zersetzung des Carnallits erfolgt über die beiden Hydratationsstufen Carnallit-Dihydrat und Carnallit-Anhydrid.

Nach Ausweis von Laboruntersuchen an Pulverproben setzt unter Raumbedingungen eine nachweisbare thermische Zersetzung von Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) bei etwa 80 °C ein. Allerdings hängt die thermische Zersetzung von dem im verfügbaren Porenraum wirkenden Wasserdampfpartialdruck ab (Jockwer 1980). Kern & Franke (1980) zeigen, dass die Wasserabgabe sich mit steigendem Druck zu höheren Temperaturen verschiebt, wobei Carnallit in einem Porenraum-freien System bis zum Schmelzpunkt bei 167,5 °C stabil ist (Will & Hinze 1983). Entsprechend ist bei Herrmann (1983, Tab. 28) vermerkt, dass bei absolut trockener Luft keine untere Grenztemperatur angegeben werden kann, bei der Carnallit gegen die Abgabe von Kristallwasser stabil bleibt.

Carnallit als Hauptkomponente bildet mit Steinsalz und anderen Salzmineralien das Salzgestein Carnallitit, das u. a. wegen seines Kaligehalts von wirtschaftlicher Bedeutung ist. Aus hydro-mechanischer Sicht handelt es sich beim Carnallitit, wie bei Steinsalz, unter unverritzten Bedingungen um ein hydraulisch dichtes Salzgebirge (Popp et al. 2010), d. h. der für eine thermische Zersetzung zur Verfügung stehende Porenraum ist sehr klein. Insofern sind die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen mit Pulverpräparaten nur eingeschränkt auf die Gebirgsbedingungen übertragbar.

Untersuchungen von Popp & Kern (1993), die an repräsentativen Kernproben aus dem Salzstock Gorleben unter simulierten in situ-Bedingungen durchgeführt wurden, dokumentieren, dass zwar bei niedrigen Drücken (wenige MPa) eine Wasserabgabe ab ca. 100°C nachweisbar ist, dass aber der Effekt mit zunehmender Einspannung sukzessive geringer wird. Bei konstanter Temperatur stellt sich jeweils ein Gleichgewichtszustand ein.

Dies wird auf den Anstieg des Wasserdampfpartialdruckes im Porenraum zurückgeführt. Dieser "Selbststabilisierungsmechanismus" bewirkt, dass Carnallitit unter den Bedingungen des "unverritzten" Gebirges selbst bei Temperaturen bis zum Schmelzpunkt nicht signifikant thermisch zersetzt wird.

Im Falle eines thermomechanischen Belastungszustands, der Dilatanz und damit Porenraum zur Folge hat, z. B. in der Auflockerungszone, kann sich im Gestein kein stabilisierender Wasserdampfpartialdruck aufbauen. Als Folge wird sich der Carnallitit bei Temperaturen ab 80 °C thermisch zersetzen und der dabei freigesetzte Wasserdampf über die durch Auflockerung geschaffenen Wegsamkeiten in andere Gesteinsbereiche oder Grubenhohlräume migrieren.

97.3 Sachlage am Standort

Carnallit kommt im Salzstock Gorleben als Hauptkomponente des Kaliflözes Staßfurt vor. Dies bildet das stratigraphische Hangende des Hauptsalzes. Bei der Auffahrung der Einlagerungsbereiche wird durch geologische Vorerkundung sichergestellt wird, dass in den Einlagerungsbereichen kein Carnallit vorkommt und weiterhin ein Sicherheitsabstand von mindestens 50 m zwischen dem Kaliflöz Stassfurt und den Einlagerungsbereichen eingehalten wird. Nur an zwei Stellen im Grubengebäude, nämlich den Richtstrecken aus den Infrastruktur- zu den Einlagerungsbereichen, wird das im Mittel bis zu 10 m mächtige Carnallititflöz durchfahren und somit in der Strecke direkt aufgeschlossen.

Unabhängig davon wird der Carnallitit durch den Wärmeeintrag aus den im Hauptsalz befindlichen Einlagerungsbereichen mit erfasst. Eine thermische Carnallitzerersetzung hängt von den Zustandsbedingungen (unverritz/aufgelockert) und der Maximaltemperatur im Carnallitit, d. h. vor allem von der Distanz zur Wärmequelle, ab. Dies wird bereits bei der Endlagerplanung mittels orientierenden thermischen Auslegungsrechnun-

gen berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass für das Streckenlagerungskonzept beim gewählten Sicherheitsabstand die Temperatur im Carnallit generell niedriger als 80 °C sein wird. Im Falle des Bohrlochkonzeptes können die Temperaturen im Bereich des Carnallits lokal höher als 80 °C sein.

Allerdings wirkt im dichten Salzgebirge immer der vorher beschriebene "Selbststabilisierungsmechanismus", der infolge des Anstiegs des Wasserdampfpartialdruckes eine signifikante Carnallitersetzung verhindert, so dass der Carnallit bis zum Schmelzpunkt von 167,5 °C stabil ist (Popp & Kern 1993).

Nur unter Dilatanzbedingungen (Auflockerung mit Absenkung des Wasserdampfpartialdruckes), d. h. an den Stellen, wo der Carnallit direkt aufgeschlossen ist, würde es bei Temperaturen über 80 °C zu einer weitergehenden Carnallitersetzung kommen. Diese besondere Situation der Streckendurchführungen durch das Kaliflöz wird ebenfalls bereits bei der Endlagerkonzeption berücksichtigt. Die dafür durchgeführten orientierenden Auslegungsrechnungen belegen, dass die Maximaltemperaturen dort, unabhängig vom Einlagerungskonzept niedriger sein werden.

97.4 Standortspezifische Auswirkungen

Bei thermischer Zersetzung, d. h. ohne Beachtung eines Sicherheitsabstandes zwischen den Einlagerungsbereichen und den carnallithaltigen Schichten, könnte durch die Abgabe des Hydratwassers aus dem Carnallit freies Wasser im Grubenbau auftreten, das dann z. B. für die Korrosion von Abfallbehältern zur Verfügung stehen würde. Bei aufgelockertem Gebirge könnte die Feuchte zu beschleunigtem Kriechen im Steinsalz führen.

Durch die Erkundungsmaßnahmen wird sichergestellt, dass keine signifikanten Mengen an Carnallit im Einlagerungsbereich vorhanden sind, so dass dort keine Auswirkungen zu besorgen sind. Weiterhin ist ein ausreichender Sicherheitsabstand von 50 m zwischen Einlagerungsbereichen und carnallithaltigen Schichten vorgesehen, der sowohl die Temperaturbelastung vermindert als auch eine mechanische Schädigung als Folge einer Hohlraumauffahrung ausschließt. Selbst wenn dieser Sicherheitsabstand lokal unterschritten wird, ist, solange der Carnallit unverritz bleibt, aufgrund des vorliegenden "Selbststabilisierungsmechanismus" nicht zu erwarten, dass eine signifikante Carnallitersetzung möglich wird (Popp & Kern 1993).

An den zwei Stellen, an denen der Carnallitit aufgeschlossen ist und prinzipiell bei Temperaturen ab 80 °C eine thermische Zersetzung zu erwarten wäre, ist durch die räumliche Auslegung des Endlagers gewährleistet, dass die dort eintreten Maximaltemperaturen kleiner als 80 °C sein werden.

Somit ist eine thermische Carnallitzerersetzung im Endlagersystem nicht zu betrachten.

97.5 Zeitliche Beschränkung

Die durch die eingelagerten hochradioaktiven Abfälle hervorgerufenen Temperaturerhöhungen erreichen in der Nähe der Einlagerungsbereiche ihr Maximum nach wenigen 100 Jahren.

97.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

97.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

97.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

97.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Da Carnallitit im Salzstock Gorleben vorhanden ist, ist seine thermische Zersetzung als Prozess nicht auszuschließen. Allerdings wird bereits bei

der Endlagerauslegung sichergestellt, dass die thermischen Einwirkungen auf Carnallit, der im dichten Salzgebirge vorliegt, deutlich unterhalb der Schmelztemperatur liegen, sowie bei direkten Einwirkungen auf aufgeschlossenen Carnallit der Temperaturgrenzwert von 80 °C nicht erreicht wird.

Wirkung in den Teilsystemen: Da im Endlager durch dessen Auslegung maximal Temperaturen von 200 °C an der Kontaktfläche der Behälter zur Umgebung auftritt und im Endlagerkonzept ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen Einlagerungsbereichen und den carnallithaltigen Schichten vorgesehen ist, ist eine thermische Carnallitzerersetzung nicht zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: siehe Wirkung in den Teilsystemen

97.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

97.11 Offene Fragen

Keine.

97.12 Literaturquellen

Freyer, D. , Voigt, W., Böttge, V. (2006): Zur thermischen Stabilität von Tachhydrit und Anhydrit. Kali und Steinsalz, (2006)1: 28-37.

Herrmann, A.G. (1983): Radioaktive Abfälle. - Springer-Verlag; Berlin.

Jockwer, N. (1980): Die thermische Kristallwasserfreisetzung des Carnallits in Abhängigkeit von der absoluten Luftfeuchtigkeit. - Kali und Steinsalz, Bd. 8, H. 2: 55-58, 5 B.; Essen.

Kern, H., Franke, J.-H. (1980): Thermische Stabilität von Carnallit unter Lagerstättenbedingungen. - Glückauf-Forsch.-H., 41/6: 252-255, 6 B.; Essen.

Popp, T., Kern, H. (1993): Thermal dehydration reactions characterized by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. Earth Planet. Sci. Lett., 120: 43-57.

Popp, T., Salzer, K., Weise, D., Wiedemann, M. (2010): Hydraulische Barrierenintegrität von carnallititischem Salz-gebirge, Kali und Steinsalz, Heft 2/2010: 16-23.

Will, G., Hinze, E. (1983): Entwässerungsverhalten von hydratisierten Salzphasen als Funktion des Druckes. - In: Versuchseinlagerung hochradioaktiver Abfälle im Salzbergwerk Asse; 1. Halbjahresbericht, GSF; Braunschweig.

98 Schmelzen des Salzgesteins (2.2.10.04)

98.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Schmelzen wird der Phasenübergang eines Stoffes vom festen in den flüssigen Aggregatzustand bezeichnet.

98.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das Ausmaß eines Phasenübergangs eines Minerals von fest zu flüssig ist abhängig von den herrschenden Temperatur- und Druckbedingungen. Dabei nehmen in der Regel die Schmelztemperaturen mit zunehmendem Druck ab. Bei Mineralgemischen spielt zusätzlich die Zusammensetzung eine große Rolle, oft handelt es sich dabei um eutektische Gemische mit einem erniedrigten Schmelzpunkt.

Ein gut untersuchtes Beispiel für die Auswirkungen hoher Temperaturen auf verschiedene Salzgesteine sind die Intrusivgänge, die in den flachgelagerten Zechsteinevaporiten des Werra-Fulda-Lagerstättenbezirks auftreten (Knipping 1989, Knipping et al. 1985). Basaltische Schmelzen drangen dort vor etwa 15 – 25 Millionen Jahren mit Temperaturen von 1.150 °C in das Salzgestein ein und erstarrten in den Steinsalzschiechten unter Bildung von steil stehenden Basaltgängen. Das Steinsalz wurde hierbei im Kontaktbereich auf Temperaturen bis zu ca. 800 °C aufgeheizt; die Temperaturen gingen aber relativ schnell auf unter 100 °C zurück.

Die Ausdehnung von Aufschmelzen und Mineralveränderungen blieb im Na-reichen Steinsalz auf wenige Zentimeter Distanz von der Oberfläche der Basaltintrusion begrenzt und erreichte lediglich in K-Mg-Salzbändern eine Ausdehnung von bis zu 10 m.

98.3 Sachlage am Standort

Da es sich um Ionenverbindungen handelt, weist der Großteil der Salzminerale, aus denen das Wirtsgestein gebildet wird, eine hohe thermische Stabilität auf. Die Minerale Halit (NaCl) und Sylvin (KCl) haben nahezu identische Schmelztemperaturen von ca. 800°C (bei Atmosphärendruck). Ein Gemisch von Halit und Sylvin schmilzt dagegen bei 660°C. Calcit schmilzt bei etwa 825 °C, Anhydrit ab 1.450 °C. Carnallit hat die nied-

rigste Schmelztemperatur unter den evaporitischen Mineralen von 168°C. Die thermische Zersetzung von Carnallit ist im FEP Thermische Carnallitzerersetzung beschrieben.

98.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Auslegung des Endlagers erfolgt derart, dass die Temperaturen auf maximal 200°C begrenzt sind (Mönig et al. 2012). Auf Grund der wesentlich höheren Schmelztemperaturen der Evaporite sind keine Auswirkungen zu betrachten. Die Auswirkungen einer möglichen thermischen Zersetzung von Carnallit sind im FEP Thermische Carnallitzerersetzung beschrieben.

98.5 Zeitliche Beschränkung

Die durch die eingelagerten hochradioaktiven Abfälle hervorgerufenen Temperaturerhöhungen erreichen ihr Maximum nach wenigen 100 Jahren.

98.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

98.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

98.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

98.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Die Auslegung des Endlagers erfolgt derart, dass die Temperaturen auf maximal 200 °C begrenzt sind (Mönig et al. 2012). Auf Grund der wesentlich höheren Schmelztemperaturen der Evaporite sind keine Auswirkungen zu betrachten. Die Auswirkungen einer möglichen thermischen Zersetzung von Carnallit sind im FEP Thermische Carnallitzerersetzung beschrieben.

Wirkung in den Teilsystemen: siehe Begründung Eintrittswahrscheinlichkeit

Beeinträchtigung der Initial-Barrieren: siehe Begründung Eintrittswahrscheinlichkeit

98.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

98.11 Offene Fragen

Keine.

98.12 Literaturquellen

Knipping, B., Herrmann, A.G. (1985): Mineralreaktionen und Stofftransporte an einem Kontakt Basalt-Carnallit im Kalisalzhorizont Thüringen der Werra-Serie des Zechsteins, Kali u. Steinsalz 9: 111-124.

Knipping, B. (1989): Basalt intrusions in evaporites. Lecture Notes in Earth Sciences, 24, Springer-Verlag; Berlin.

Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.

Weiterführende Literatur:

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M. (2011): Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3 - Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. - Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 73; Hannover.

Braitsch, O. (1971): Salt Deposits - Their Origins and Composition. Springer-Verlag; Berlin.

Gevantman, L.H. (1981): Physical properties data for rock salt. - National Bureau of Standards, NBS Monograph 167; Washington.

99 Thermochemische Sulfatreduktion (2.2.10.05)

99.1 Definition/Kurzbeschreibung

Redoxreaktion von organischen Verbindungen oder molekularem Wasserstoff mit Sulfaten bei erhöhten Temperaturen unter Bildung von Carbonaten, Sulfiden, Wasser, Schwefelwasserstoff oder CO₂.

99.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die thermochemische Reduktion von Sulfaten ist ein exothermer Prozess mit Kohlenwasserstoffen oder molekularem Wasserstoff. Der Wasserstoff kann z. B. durch Aromatisierung langkettiger Alkane oder aus anorganischen Korrosionsprozessen gebildet sein (Machel 2001, Ostertag-Henning 2008). Dabei wird der reduzierte Schwefel meist in Form von Sulfid bzw. Schwefelwasserstoff oder auch in intermediären Oxidationsstufen (Sulfit, Thiosulfat, elementarer Schwefel) gebildet. Die Thermochemische Sulfatreduktion findet bevorzugt im sauren Milieu statt.

Auf der Grundlage experimenteller Befunde wird davon ausgegangen, dass bei einer Temperatur von 200 °C die Halbwertszeit für die Umsetzung von Sulfat in der Gegenwart von molekularem Wasserstoff in der Größenordnung von 10 Jahren liegt. Bei 90 °C beträgt die extrapolierte Halbwertszeit des Sulfats ca. 210.000 Jahre, falls keine anderen limitierenden Faktoren vorliegen (Truche et al. 2009).

99.3 Sachlage am Standort

Als natürlicher Bestandteil von Evaporiten kommt auch im geplanten Einlagerungsbereich des Salzstocks Gorleben Anhydrit (Calciumsulfat, CaSO₄) vor. Im für die Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle vorgesehenen Hauptsalz der Staßfurt-Folge erreichen die Anhydritgehalte maximal 4 Gew.- % bis 8 Gew.- %, mit dem Trend einer Abnahme vom Liegenden zum Hangenden (Bornemann et al. 2008). Bei einer Erhöhung der Temperatur und Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen bzw. molekularem Wasserstoff kann es zur thermochemischen Reduktion des Sulfats kommen. Nachgewiesen ist dieser Prozess über geologische Zeiträume für Temperaturen ab 80 °C.

Durch die anfängliche Temperaturerhöhung im Einlagerungsbereich, die mögliche nestartige Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen sowie die möglicherweise bei Anwesenheit von Wasser (fluid inclusions, Restwässer aus dem Versatz) durch Metallkorrosion verursachte Produktion von molekularem Wasserstoff liegen im Hauptsalz über einen Zeitraum von etwa 500 Jahren ggf. Voraussetzungen für den Ablauf des Prozesses der thermochemischen Sulfatreduktion vor. Die für den Prozess notwendigen Edukte - organische Verbindungen oder Wasserstoff, Sulfat - sind im Einlagerungsbereich in stark schwankenden Konzentrationen vorhanden bzw. werden möglicherweise im Nahfeld gebildet. Weiter entfernt vom Nahfeld und vom angrenzenden aufgelockerten Festgestein sind zwar die Edukte in meist geringen, aber stark variierenden Mengen vorhanden, doch die Mindesttemperatur von ca. 80°C wird nur im Nahfeld und Nahfeldnahen Strecken wahrscheinlich erreicht.

99.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Sulfatreduktion kann durch das unterschiedliche Volumen von Edukten und Produkten den Spannungszustand im Gebirge beeinflussen und durch die mit der Sulfatreduktion verbundene Gasproduktion Auswirkungen auf potenzielle Transportwege bzw. -prozesse haben. Eine überschlägige Abschätzung ergab, dass bei der Sulfatreduktion mit einer Volumenzunahme der beteiligten Stoffe zu rechnen ist (Weber et al. 2011). Die Reaktion ist mit einer Volumenzunahme um ca. 10 % verbunden. Nicht berücksichtigt wurde dabei die Expansion der beteiligten Stoffe durch Gasbildung, wobei allerdings das produzierte Gas weniger Volumen als das Ausgangsgas einnimmt. Die Volumenzunahme des Ausgangsgesteins im Ergebnis der Sulfatreduktion um ca. 10 % bedeutet, bezogen auf die

kohlenwasserstoffhaltigen Bereiche des Hauptsalzes, bei vollständiger Umsetzung des darin enthaltenen Anhydrits eine maximale Volumenzunahme von unter 1 %. Eine solche vollständige Umsetzung ist nicht zu erwarten, da die enthaltenen Kohlenwasserstoffmengen zu gering sind.

Die Bildung von molekularem Wasserstoff durch thermischen Zerfall von im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben angetroffenen Kohlenwasserstoffen ist bei einem Reaktionszeitraum von bis zu einer Million Jahren ab ca. 80 °C möglich (Helgeson et al. 2009). D. h. der Prozess der thermochemischen Sulfatreduktion durch Kohlenwasser-

stoffe ist auf einen Zeitraum von wenigen hundert oder tausend Jahren beschränkt, in dem die Temperatur im Endlager deutlich über dem natürlichen Niveau liegt.

Durch die mit der Sulfatreduktion verbundene Gasproduktion können sich Auswirkungen auf potenzielle Transportprozesse ergeben. Die durch die Reaktion gebildeten Gase -Schwefelwasserstoff und evtl. Kohlendioxid - erhöhen die Menge der Gase im Grubenbau, sofern sie nicht durch nachfolgende Reaktionen als Feststoffe fixiert werden (z. B. als Calciumcarbonat). Durch die Bildung von Schwefelwasserstoff werden die Redoxbedingungen im Nahfeld verändert. Durch die neugebildeten Gase werden auch andere vom chemischen Milieu abhängige Prozesse, wie z. B. die Korrosion der Behältermaterialien und der Abfallmatrix beeinflusst.

Die Auswirkungen der thermochemischen Sulfatreduktion hängen stark von den Umsetzungsraten ab, die wiederum u. a. von der Menge und Zusammensetzung der zur Verfügung stehenden Kohlenwasserstoffe sowie von der Zugänglichkeit des Sulfates für den Reduktionsprozess beeinflusst werden. Durch die autokatalytische Natur des Prozesses und die exotherme Reaktion werden die Stabilitäten von organischen Verbindungen im Umfeld der Einlagerungsgebilde durch die erhöhte Temperatur und die geänderten pH-Bedingungen herabgesetzt.

99.5 Zeitliche Beschränkung

Die Thermochemische Sulfatreduktion endet, sobald die Edukte verbraucht sind oder die Temperatur unter die Mindesttemperatur gefallen ist. Eine zeitliche Beschränkung ergibt sich daraus, dass im unmittelbaren Umfeld der Einlagerungsbereiche die Initiierungstemperaturen für den Prozess nach ca. 500 Jahren unterschritten werden. Durch die Bildung von Karbonat aus dem bei der Oxidation von organischen Substanzen entstehenden Kohlendioxid kann die Zugänglichkeit des im Gestein vorhandenen Sulfates für die Kohlenwasserstoffe bzw. den molekularen Wasserstoff erschwert oder vollständig unterbunden werden.

99.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

99.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

99.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein

99.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Durch die Aufheizung des Gebirges und das Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen bzw. molekularem Wasserstoff wird die thermochemische Sulfatreduktion als wahrscheinlich ablaufender Prozess eingestuft.

Wirkung in den Teilsysteme: Die für den Ablauf des Reduktionsprozesses erforderlichen Voraussetzungen (Mindesttemperatur, Vorhandensein von KW bzw. molekularem Wasserstoff) sind nur im unmittelbaren Nahfeld der Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöcher, den Einlagerungsfeldnahen Strecken (z. B. Querschläge) und im Wirtsgestein selbst gegeben.

Einwirkungen auf Initial-Barrieren: Eine direkte Einwirkung auf die Initial-Barriere „Wirtsgestein“ ist durch eine Umwandlung (z. B. Sulfatverbrauch, Karbonatbildung) von Wirtsgesteinskomponenten gegeben. Sofern im Nahfeld aus der Reaktion Säuren zur Verfügung stehen, kann die Integrität der Brennelement-Behälter indirekt über das geochemische Milieu beeinträchtigt werden.

99.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Versatz

Wärmeproduktion

Gasmenge im Grubenbau

Wirtsgestein

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Begründungen:

Versatz: Das Sulfat im Versatz kann Ausgangsstoffe für die thermochemische Sulfatreduktion liefern.

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein, Wirtsgestein, Wärmeproduktion: Die Reaktion ist möglich, wenn Kohlenwasserstoffe im Gestein, entsprechend hohe Temperaturen und Anhydrit im Wirtsgestein vorhanden sind.

Gasmenge im Grubenbau: Die Gasmenge im Grubenbau (Wasserstoff aus der Metallkorrosion) beeinflusst den Ablauf der Reaktion.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Durch Wasserstoffvorkommen im Wirtsgestein (fluid inclusions) kann die thermochemische Sulfatreduktion ausgelöst werden.

Resultierende FEP:

Gasbildung

Begründungen:

Gasbildung: Bei der thermochemischen Sulfatreduktion werden H_2S und CO_2 gebildet.

Beeinflusste FEP:

Versatz

Sonstige Verschlussbauwerke

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Ausfall eines Dichtpfropfens

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Zersetzung von Organika

Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Komplexbildung

Begründungen:

Versatz: Das Sulfat im Salzgrus kann durch die thermochemische Sulfatreduktion umgewandelt werden.

Sonstige Verschlussbauwerke; Ausfall eines Dichtpfropfens: Die thermochemische Sulfatreduktion kann zur Alteration sulfatischer Baustoffbestandteile (Anhydrit im Salzgrus) führen und durch die Volumenzunahme die mechanischen Eigenschaften der Dichtpfropfen verändern und so deren Dichtigkeit beeinträchtigen.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Die thermochemische Sulfatreduktion führt zu einer Volumenzunahme und bewirkt somit lokal eine Erhöhung der Gebirgsspannung.

Lösungen im Grubenbau: Bei der thermochemische Sulfatreduktion entsteht Wasser, das in den Grubenbau zutreten könnte.

Geochemisches Milieu im Grubenbau; Fluidvorkommen im Wirtsgestein; Wirtsgestein
Durch die Reaktionsprodukte kann sich das geochemische Milieu im Grubenbau ändern. Bei der Reaktion entsteht Wasser, was eine Erhöhung der im Wirtsgestein befindlichen Fluidmenge bedeutet und wodurch es gleichzeitig zur Auflösung von Salzgestein kommen kann.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien: Das Reaktionsprodukt Kalziumkarbonat nimmt ein höheres Volumen ein als das Ausgangsmaterial Kalziumsulfat.

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein; Zersetzung von Organika: Mit dem Ablauf der Reaktion können die im Umfeld der wärmeerzeugenden Abfälle vorhandenen Kohlenwasserstoffe abgebaut werden.

Bemerkungen:

Sofern Säuren als Reaktionsprodukte im Nahfeld gebildet werden, können diese über eine Änderung des geochemischen Milieus indirekt das Metall der Brennelement-Behälter beeinflussen.

99.11 Offene Fragen

Klärung der limitierenden Parameter für den Ablauf des Reaktionsprozesses, insbesondere der Gehalte, Zusammensetzung und Verteilung der Kohlenwasserstoffe sowie der Höhe der erforderlichen Mindesttemperatur; qualitative und quantitative Abschätzung des möglichen Ausmaßes der Stoffumsätze im Ergebnis des Reduktionsprozesses. Fraglich ist insbesondere, in wieweit die Kinetik den Reaktionsfortschritt behindert.

Die Folgen einer möglichen Volumenzunahme bei der thermochemischen Sulfatreduktion auf die Druckverhältnisse im Salzstock sind noch nicht bekannt.

Es ist zu prüfen ob organische Säuren als Reaktionsprodukte gebildet werden können und gegebenenfalls deren Einfluss auf Brennelement-Behälter zu bestimmen.

99.12 Literaturquellen

Amrani, A. et al. (2008): The role of labile sulfur compounds in thermochemical sulfate reduction. - *Geochim. Cosmochim. Acta* 72: 2960-072; Amsterdam.

Helgeson, H.C., Laurent, R., Mckenzie, W.F., Norton, D.L., Schmitt, A. (2009): A chemical and thermodynamic model of oil generation in hydrocarbon source rocks. - *Geochim. Cosmochim. Acta* 73: 594-695; Amsterdam.

Machel, H. (2001): Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: old and new insights. - *Sedimentary Geology* 140: 143-175; Amsterdam.

Ostertag-Henning, C. (2008): Untersuchungen zur thermochemischen Sulfatreduktion: Etablierung der experimentellen Aufbauten und der analytischen Verfahren.-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 19 S., 9 Abb., Hannover.

Truche, L., Berger, G., Destrigneville, C., Pages, A., Guillaume, D., Giffaut, E., Jacquot, E. (2009): Experimental reduction of aqueous sulphate by hydrogen under hydrothermal conditions: implication for the nuclear waste storage. - *Geochim. Cosmochim. Acta* 73: 4824-4835; Amsterdam.

Weber, J.R., Hammer, J., Schulze, O. (2011): Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. - BGR, Bericht, B3.2/B50123-09/2011-0001: 28 S.; Hannover.

Zhang, T. et al. (2008): Geochemical signatures of thermochemical sulfate reduction in controlled hydrous pyrolysis experiments. - *Organic Geochemistry* 39: 308-28.

100 Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein (2.2.11.01)

100.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bei Fluiddrücken mit Überschreitung der kleinsten Hauptspannung im Gebirge kann es zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität des Salzgesteins (sekundäre Permeabilität) durch die lokale Aufweitung der Korngrenzen kommen und Fluide (Gase/ Lösungen) können in die betroffenen Bereiche infiltrieren.

100.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In der Nachverschlussphase eines Endlagers wird es im zeitlichen Verlauf durch Konvergenz und Gasbildung (vgl. FEP Gasbildung und FEP Konvergenz) sowie durch einen möglichen Fluidzutritt aus dem Gebirge oder über technische Verschlüsse (Schacht/Strecke) zu einem Druckanstieg innerhalb des Endlagers kommen (vgl. RSK 2005, Rübel et al. 2004, 2008, sowie FEP Fluiddruck). Gleichzeitig wirken in einem durchlässigen Deck- und Nebengebirge einer Salzstruktur ebenfalls Fluiddrücke in der Größenordnung der hydrostatischen Flüssigkeitssäule (vgl. FEP Grundwasserströmung in Deck- und Nebengebirge).

Für die Bewertung fluiddruckinduzierter Auswirkungen wird bei der rechentechnischen Nachweisführung zur Integrität und Dichtheit von Salinarbarrieren (neben dem Dilatanzkriterium) allgemein das Minimalspannungskriterium herangezogen. Es besagt, dass die in der Steinsalzbarriere wirksamen Fluiddrücke stets kleiner als die kleinste Hauptspannung im Gebirge sein müssen. Wenn dies nicht eingehalten wird, ist formal das Minimalspannungskriterium verletzt. Dann ist z. B. für eine Fluiddruckwirkung von außen zu zeigen, dass die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt (BMU 2010). Folgende Auswirkungen eines erhöhten Fluiddruckes auf das Salzgestein sind denkbar (Rübel & Mönig 2008):

- das Überschreiten der lokal jeweils vorhandenen Minimalspannung σ_{\min} und der hydraulischen Zugfestigkeit durch den Fluiddruck kann zur Bildung eines Risses

(Gas- oder hydraulischer Frac) führen, welcher sich dann in Richtung der größten Gebirgshauptspannung fortpflanzt,

- ein hoher Fluiddruck kann mit Überschreiten der lokal jeweils vorhandenen Minimalspannung σ_{\min} infolge mechanischer Gesteinsdeformation zu einer lokalen Aufweitung des Porenraums des Salzgesteins und zur Bildung einer sogenannten Sekundärporosität (Schädigung) führen.
- das Überschreiten des Gebirgsdrucks durch einen Fluiddruck kann zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität (Sekundärpermeabilität) des Salzgesteins durch die elastische Aufweitung von Korngrenzen mit Erhöhung der Permeabilität führen (Vergrößerung des Porenvolumens ohne Zerstörung der Kristallstruktur, d. h. ohne Schädigung). Dabei kann Fluid in das Gestein eindringen und dort gespeichert werden. Dieser Prozess wird als Infiltration bezeichnet (vgl. Popp et al. 2007, Lux et al. 2009). Die Permeabilität erhöht sich so lange, bis sich ein Gleichgewicht zwischen dem Druckanstieg und dem Infiltrationsprozess einstellt. Sinkt der Fluiddruck wieder unter den Gebirgsdruck bzw. σ_{\min} , so wird die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Salzgesteins wieder hergestellt (Selbstverheilungsmechanismus).

Das FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein beschreibt die dritte Option, die für Steinsalz den wahrscheinlichsten Prozess darstellt (Popp et al. 2007, Lux et al. 2009). Für die Bewertung der daraus resultierenden Infiltrationsprozesse hinsichtlich der Barrierenintegrität gibt es Ergebnisse aus neueren Untersuchungen im Labor (Popp et al. 2007, Lux et al. 2010) und in situ (Popp et al. 2007, 2012), sowie gekoppelten mechanisch-hydraulischen Berechnungen mit Bewertung aktueller Versagensfällen von Salinarbarrieren im Kalibergbau (Minkley et al. 2010).

Dabei ist zu konstatieren, dass die druckgetriebene Infiltration von Fluiden ein von dilatanter Schädigung unabhängiger zeitabhängiger, druckgetriebener Versagensmechanismus ist, der im Wirtsgestein wirksam ist, d. h. für einen Fluidtransport ist nicht die gleichzeitige Verletzung des Dilatanzkriteriums Voraussetzung. Die Fluidausbreitung findet über eine hydraulische Aufweitung von Wegsamkeiten im mikro- und makroskopischen Maßstab (d. h. Korngrenzen, Schichtflächen) statt. Bei einem HAW-Endlager kommt hinzu, dass in der Salzbarriere infolge der Temperaturerhöhung in den Einlagerungsbereichen thermo-mechanische Spannungsänderungen induziert werden, die auch zu weiträumigen Spannungsumlagerungen führen (vgl. BGR 2000, Kock et al. 2012 sowie FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung).

Die Analyse des Trag- und Barriereverhaltens unter Einwirkung druckgetriebener Fluidinfiltration im Langzeitprozess hat anhand numerischer Simulationstools zu erfolgen, wobei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Während Lux et al. (2010) die Ausbildung einer homogenen Infiltrationsfront mit dem Rechenprogramm INFIL auf Basis des kontinuumsmechanischen Programms FLAC3D beschreiben, simulieren Minkley et al. (2010) die lokalisierte Fluidausbreitung in potentiellen Wegsamkeiten entlang von Diskontinuitäten (z. B. Klüfte, Schichtflächen) mit Diskontinuumsprogrammen (z. B. UDEC, TRIDEC).

Die Bestimmung der möglichen Reichweite druckgetriebener Infiltrationsprozesse infolge der Entwicklung eines Gasdruckes im Endlager ist gegenwärtig Gegenstand von Forschungsarbeiten, die sowohl experimentelle Felduntersuchungen in dem ehemaligen Salzbergwerk Merkers als auch numerischen Simulationsrechnungen umfassen (Popp et al. 2012). Im Rahmen des dabei durchgeführten Großinjektionsversuchs (50 m³ Hohlraumvolumen) wurde das Salzgestein schrittweise mit einem Gasdruck belastet. Bei ca. 68 bar kam es infolge der Überschreitung von σ_{\min} zu einem Gasdurchbruch in Richtung von zwei ca. 20 m entfernten Beobachtungsbohrungen. Die druckgetriebene, gerichtete Ausbreitung von Fluiden entlang eines 2 m mächtigen Schichtpakets wurde mittels des vorhandenen mikro-seismischen Netzwerkes online dokumentiert. Als Folge der dabei stattfindenden Druckentlastung stellte sich die ursprüngliche Dichtheit des Salzgebirges wieder her, womit ältere Ergebnisse von kleinmaßstäblichen Bohrlochversuchen bestätigt wurden (vgl. Popp et al. 2007).

100.3 Sachlage am Standort

Das Salzgestein am Standort ist für Fluide dicht, d. h. nach gängigen Definitionen ist die Permeabilität kleiner 1E-22 m² (vgl. FEP Permeabilität). Ein Verlust der Dichtheit der Salzgesteine kann nach Minkley et al. (2010) nur durch Schaffung von Konnektivität, d. h. Schaffung mit einander verbundener Rissöffnungen in den interkristallinen Strukturen bewirkt werden, entweder durch deviatorische Rissbildung (vgl. FEP Auflockerungszone sowie das FEP Störungen und Klüfte im Wirtsgestein) oder durch die Fluiddruck-hervorgerufene Öffnung von Korngrenzen und Vernetzung interkristalliner Fließwege (= druckgetriebene Fluidinfiltration). Der letztgenannte Prozess beschreibt sowohl die Effekte aus einer Fluiddruckerhöhung im Endlager als auch die Wirkung der außerhalb der Salzstruktur wirkenden Flüssigkeitssäule.

Für die Beschreibung der Effekte von den im Deck- und Nebengebirge vorliegenden Fluiden wird allgemein der resultierende hydrostatische Druck in der entsprechenden Teufe angesetzt. Dabei sind insbesondere die Spannungszustände im Hangenden am Salztop relevant, da eine zeitabhängige, fluiddruck-generierte Vernetzung von interkristallinen Fließwegen möglich wird, wenn es infolge der thermischen Gebirgsausdehnung zu einem Abfall der Gebirgseinspannung unter den am Salzspiegel anstehenden Flüssigkeitsdruck kommt. Eine Bewertung dieser Prozesse erfolgt im Rahmen der geomechanischen Integritätsanalyse, wobei die Auswirkungen einer möglichen Fluidsäule für die standortspezifischen Rahmenbedingungen mit der zu erwartenden thermo-mechanischen Spannungsentwicklung simuliert werden.

Abhängig von der Entwicklung des Endlagersystems (vgl. FEP Fluiddruck) wird sich in den Einlagerungsbereichen infolge eines möglichen Lösungszutrittes sowie Gasbildung ein Fluiddruck ausbilden. Er hängt wesentlich davon ab, inwieweit die technischen Verschlüsse und insbesondere die Kontaktzone zwischen Verschlussmaterial und Gebirge dicht sind sowie die ALZ verheilt ist, so dass die resultierende Dichtwirkung in der Größenordnung des Gebirges liegt (vgl. hierzu die FEP Vorzeitiges Versagen eines Schacht- bzw. Streckenverschlusses). Im Bereich der Infrastrukturräume ist eine Verfüllung mit Basaltschotter vorgesehen, so dass dort ein Speichervolumen zur Verfügung steht.

Sollte der Fluiddruck über den Gebirgsdruck steigen wird auf Grund der Untersuchungen von Popp et al. (2007) die Erhöhung der lokalen Permeabilität des Salzgesteins als wahrscheinliche Entwicklung für den Standort angesehen. Das bedeutet, dass bei einem Anstieg des Fluiddruckes in einem Einlagerungsbereich im Bereich der kleinsten Minimalspannung die freigesetzten Fluide in das Salzgestein (hier: Steinsalz) abfließen und dort gespeichert werden (Infiltrationsprozess). Die Permeabilitäts-erhöhung des Steinsalzes ist abhängig von der Differenz zwischen Fluiddruck und minimaler Hauptspannung im Gebirge und kann mehrere Größenordnungen umfassen.

Das Steinsalz wird durch die Fluidinfiltration nicht im Sinne eines mechanischen Fracs geschädigt, solange der Fluiddruck nicht die hydraulische Aufreißfestigkeit³ übersteigt, sondern es kommt zu einer Aufweitung von Wegsamkeiten entlang von Korngrenzen.

³ Die hydraulische Aufreißfestigkeit ergibt sich über die mechanischen Zugspannungen, die ein Gestein aufnehmen kann, ohne dass sich Risse bilden. Die mechanische Zugfestigkeit liegt z. B. für das Steinsalz der Leine-Folge in der Größenordnung zwischen 0,5 und 3,5 MPa (z. B. Hunsche 1994).

Da dabei keine Verschiebungen an den Korngrenzen stattfinden, stellt sich nach den Befunden von Popp et al. (2007, 2012), wenn der Fluiddruck wieder niedriger wird als die kleinste Gebirgsspannung, die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Steinsalzes wieder her (Selbstabdichtungs- oder Verheilungsmechanismus).

Eine Bewertung der Konsequenzen druckgetriebener Fluidinfiltrationsprozesse innerhalb der Salzbarriere hat im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse auf Basis der prognostizierten Gasbildungsrate bzw. dem daraus resultierenden Gasdruck mittels hydro-dynamischen Simulationsrechnungen zu erfolgen, bei denen ein möglicher Fluidtransport im Salz quantifiziert wird (Popp & Hoch 2012).

100.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Die Bewertung der Auswirkungen einer druckgetriebenen Infiltration von Fluiden ist wesentlich für die Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Im Rahmen der Nachweise zur Barrierenintegrität wird deshalb mittels numerischer Modellrechnungen sowohl die Möglichkeit der Bildung potentieller Wegsamkeiten aus dem Endlager infolge der Ausbildung eines Fluiddrucks als auch die Entstehung potentieller Wegsamkeiten für das Eindringen von wässrigen Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge infolge der von außen einwirkenden Flüssigkeitssäule untersucht.

Thermomechanische Modellrechnungen (z. B. BGR 2000, Kock et al. 2012) zeigen, dass bedingt durch Aufheizung und Hebung der Spannungszustand im Salzstock großräumig verändert wird, wobei im Bereich des Salzspiegels lokal das Minimalspannungskriterium verletzt sein kann. Somit kann lokal eine druckgetriebene Infiltration von wässrigen Fluiden ins Salzgestein stattfinden. Dabei stellen steilstehende Schichtflächen bevorzugte Zonen für die fluiddruckgetriebene Infiltration dar. Allerdings nehmen die Gebirgsspannungen mit zunehmender Teufe relativ stärker zu als die Fluiddrücke, so dass nicht zu erwarten ist, dass sich durchgängige Wegsamkeiten für wässrige Fluide von außen ins Endlager ergeben. Dies wird durch die von Kock et al. (2012) durchgeführten geomechanischen Integritätsanalysen belegt, wo der Infiltrationsprozess entlang von Schichtflächen explizit untersucht wurde.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zur Gasdruckbelastbarkeit des Salzgebirges und den daraus resultierenden Konsequenzen dokumentieren, dass die Auswirkungen eines Fluiddruckanstiegs vor allem von der Rate, d. h. primär von der Gasproduktion und

dem sich zeitlich entwickelnden Fluiddruck abhängen (vgl. hierzu FEP Gasbildung und FEP Fluiddruck). Obwohl hierzu bisher noch keine abschließenden Ergebnisse aus Simulationsrechnungen vorliegen (Kock et al. 2012), können die Auswirkungen möglicher druckgetriebener Infiltrationsprozesse infolge Gasbildung auf Basis des u. a. in Popp et al. (2007, 2012) dokumentierten Prozessverständnisses bewertet werden.

Ausgehend von einer hinreichenden Gasproduktion wird sich im Endlager selber ein signifikanter Fluiddruck nur unter der Voraussetzung entwickeln, dass die geotechnischen Verschlussbauwerke hinreichend dicht sind. Einen derartigen Effekt weisen vorläufige Modellrechnungen von Kock et al. (2012) nach. Kommt es dadurch zu einem Druckaufbaus über die kleinste Hauptspannung hinaus, wird druckgetriebene Infiltration von Fluiden ins Wirtsgestein stattfinden, entsprechend den von Popp et al. (2007) beschriebenen Mechanismen, womit der weitere Fluidanstieg begrenzt wird. Auf diese Weise können Gase oder Lösungen aus dem Endlager abtransportiert und im Wirtsgestein gespeichert werden. Natürlichen Analoga dokumentieren, dass große Gasvolumina infolge von Infiltrationsprozessen (z. B. infolge vulkanischer Aktivitäten, wie bei den CO₂-Vorkommen in der Werra-Region) im Salzgebirge gespeichert sein können.

Unabhängig davon werden sich innerhalb der Salzbarriere infolge der Gasdruckbelastung keine zusammenhängenden Fließwege ergeben, solange der wirkende Fluiddruck (sowohl von außen, als auch aus dem Innern des Endlagers) nicht die hydraulische Aufreißfestigkeit des Salzgebirges übersteigt. Nur dann würden sich in Überlagerung mit mechanischen Prozessen, z. B. Scherverformung an Diskontinuitäten zusätzliche weitreichende mechanische Wegsamkeiten ergeben. Dies ist aber bei den im Endlager zu erwartenden Gasdruckanstiegsraten nicht wahrscheinlich.

100.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

100.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

100.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

100.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[X] direkt, [] indirekt, [] nicht zutreffend

Direkte Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren:

Wirtsgestein

100.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Unter der Voraussetzung, dass der Fluiddruck im Endlager bis in den Bereich des Gebirgsdruckes ansteigt bzw. infolge eines wasserführenden Deck- und Nebengebirges von außen ein hydraulischer Druck wirksam ist, ist der Prozess wahrscheinlich.

Der Prozess ist nur im Teilsystem Wirtsgestein zu betrachten. Druckgetriebene Fluidinfiltration in das Salzgestein ist nach dem aktuellen Kenntnisstand der wahrscheinliche Prozess, sobald der Fluiddruck die kleinste Hauptspannung übersteigt, wobei der sowohl im Endlager ansteigen kann, bzw. aus der Einwirkung von außen infolge einer wasserführenden Deck- und Nebengebirges resultiert. Letzteres Teilsystem ist nicht zu betrachten, da das Deck- und Nebengebirge von vornherein als wasserführend angesehen wird. Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen (Fluidinfiltration findet auch in der Auflockerungszone statt, wobei deren Permeabilität und Porosität mit zunehmendem Abstand vom Hohlraum kleiner werden, so dass sich ein gradueller Übergang zum Salzgebirge ergibt. Dieser Bereich ist für Transportrechnungen aber nicht zu berücksichtigen.

gen). Fluidinfiltration findet auch in der Kontaktzone zwischen Verschlussbauwerken und dem Gebirge statt.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Wenn der Fluiddruck (von außen bzw. im Endlager) die kleinste Hauptspannung überschreitet, kommt es zu einer Fluidinfiltration ins Wirtsgestein, wobei dieser Prozess im Rahmen der Nachweise zur Barrierenintegrität (u. a. über die Bewertung des Minimalspannungskriteriums) mittels geomechanischen und -hydraulischen Modellrechnungen untersucht wird. Allerdings besteht bzgl. der Konsequenzen, d. h. der Bewertung der Reichweite dieses Prozesses noch Forschungsbedarf.

100.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Fluiddruck

Wirtsgestein

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Begründungen:

Fluiddruck: Änderungen des Gasvolumens im Grubenbau infolge von Gasbildung beeinflussen mittelbar über den Gas- bzw. Fluiddruck den Gasinfiltrationsprozess

Wirtsgestein: Die lithologischen Eigenschaften des Wirtsgesteins (z. B. Homogenität, Anhydritanteil) bestimmen maßgeblich die Ausbildung des intergranularen Porenraums.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: sie stellen potentielle mechanische und hydraulische Schwächezonen dar, die als bevorzugte Wegsamkeiten wirksam werden können.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Das Einsetzen von Fluidinfiltration hängt unmittelbar von der kleinsten Hauptspannung ab, die lokal im Wirtsgestein unterschiedlich sein kann.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Fluiddruck

Gasmenge im Grubenbau

Begründungen:

Fluiddruck: Die Höhe eines möglichen Fluiddrucks im Grubengebäude hängt unmittelbar von Effizienz des Prozesses Fluidinfiltration bzw. der Überdruck/Permeabilitätsbeziehung oberhalb der kleinsten Gebirgsspannung im Grubengebäude ab.

Gasmenge im Grubenbau: Druckgetriebene Gasinfiltration bedingt einen Fluidtransport ins Salzgebirge, wobei nach natürlichen Analoga (z. B. CO₂-Vorkommen in der Werra-Region) große Gasvolumina im Salzgebirge gespeichert sein können.

100.11 Offene Fragen

- Ermittlung der Reichweite der Gas- bzw. Fluidausbreitungsprozesse im Salzgestein infolge druckgetriebener Infiltration zur Bestimmung eines möglichen Schadstoffaustrages
- Beim Prozess der druckabhängigen Fluidinfiltration wird unterstellt, dass entlang des Infiltrationspfades der volle Fluiddruck wirksam ist. Im Sinne eines Effektivspannungsansatzes ist wahrscheinlich, dass entsprechend einer hydraulischen Drossel eine Abminderung des wirksamen Fluiddruckes erfolgt, d. h. die Infiltration ist in ihrer Reichweite endlich. Allerdings fehlt hierfür der Nachweis.
- Bei den bisherigen Simulationstools wird zumeist eine homogene Fluidausbreitung im Sinne einer Porositätsaufsättigung zu Grunde gelegt, obwohl zahlreiche Beobachtungen zeigen, dass insbesondere eine Fluidausbreitung entlang von Diskontinuitäten (z. B. lithologisch, hydro-mechanisch) erfolgt.

- Zur Absicherung der vorliegenden Ergebnisse einer druckgetriebenen Fluidinfiltration fehlen weitergehende experimentelle Ergebnisse, die im Rahmen von Labor- und Felduntersuchungen gewonnen werden müssen, sowie qualifizierte numerische Rechentools.

100.12 Literaturquellen

BGR (2000): Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung, BSK3). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin.

Hunsche, U. (1994): Uniaxial and triaxial creep and failure tests on rock: Experimental technique and interpretation. In: Cristescu, N.D., Gioda, G: Visco-plastic behavior of Geomaterials, International Centre for Mechanical Science Series No. 350, Springer Verlag; Wien, New York.

Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P., (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Lux, K.-H., Wolters, R., Düsterloh, U. (2010). Weiterentwicklung der EDV-Software INFIL zur Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses von Fluiden in ein nicht permeables Barrieren-Gebirge (Salinar). BMBF FKZ 02C1355. TU Clausthal, 232 S.

Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J. (2010): Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. BMBF-Projekt FKZ 02C1264. - Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG): 214 S.; Leipzig.

Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. - Abschlussbericht des Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Salzgitter.

Popp, T., Weise, D., Salzer, K., Wiedemann, M., Günther, R., Minkley, W., Philipp, J., Dörner, D., Hotzel, S. (2012): Auswirkungen der Gasbildung im Endlager auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. - Abschlussbericht des Forschungsvorhabens (FKZ) 3609R03222, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Salzgitter.

Popp, T., Hoch, A. (2012): Gas Generation and Migration through Evaporites. Report SERCO/005126/002, im Auftrag von NDA RWMD (NPO004726).

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) (2005): RSK-Stellungnahme: Gase im Endlager (379. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Rübel, A., Noseck, U., Müller-Lyda, I., Kröhn, K.-P., Storck, R. (2004): Konzeptioneller Umgang mit Gasen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-205; Braunschweig.

Rübel, A., Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz. - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

101 Topografie (2.3.01.01)

101.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Topografie wird die Beschreibung der Ausgestaltung der Erdoberfläche verstanden. Die Oberflächengestalt entsteht durch das Zusammenwirken von endogenen und exogenen Kräften.

101.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Tektonische, epirogenetische oder orogene Prozesse verursachen langfristig eine Umgestaltung der Landschaft. Auch die Auswirkungen einer erneuten Kaltzeit können diesbezüglich erhebliche Veränderungen nach sich ziehen.

101.3 Sachlage am Standort

Das Untersuchungsgebiet Gorleben deckt mit einer Gesamtfläche von insgesamt 475 km² den östlichen Teil Niedersachsens, den westlichsten Teil von Brandenburg mit dem Prignitz-Gebiet sowie einen kleinen Teil im Westen der Mecklenburgischen Seenplatte in Mecklenburg-Vorpommern ab. Diese Bereiche werden nach Klinge et al. (2007) in drei typische Landschaftsformen gegliedert:

- Die spätglazialen bis holozänen Niederungen und Flussauen der Elbe und ihrer Zuflüsse,
- das weichselzeitliche Urstromtal der Elbe sowie
- die weichsel- bis saalezeitlichen Geestrücken.

Geomorphologisch betrachtet liegt das Gebiet im weichselzeitlichen, in nordwestlicher Richtung verlaufenden Elbe-Urstromtal, das in diesem Bereich besonders breit ist. Bestimmende morphologische Landschaftsformen sind der Südliche und Nördliche Landrücken als Wasserscheiden einerseits und die Elbeniederung als Hauptvorfluter andererseits.

Ein von SW nach NO verlaufendes Profil weist in diesen Bereichen folgende Formen auf:

1. Die aus saalezeitlichen End- und Grundmoränen und Schmelzwassersanden bestehenden Höhenrücken der Gohrde bilden den Südlichen Landrücken,
2. Die Niederung des Elbe-(Urstrom)Tals mit weichselzeitlicher Niederterrasse, holozänen Flugsanden und der Elbe als Hauptvorfluter,
3. den Nördlichen Landrücken, der aus weichselzeitlichen Endmoränen aufgebaut wird.

1. Die Niederungen und Flussauen der Elbe und ihrer Zuflüsse

Es handelt sich um ein äußerst flaches Gelände, das mit bis zu einigen Kilometern Breite parallel zum heutigen Bett des jeweiligen Gewässers verläuft. Neben der Niederung zwischen Elbe und Löcknitz im Norden des Untersuchungsgebietes finden sich diese Niederungen am Westrand des Gebietes im Bereich der Zuflüsse und Entwässerungsgräben zur Jeetzel sowie entlang der Seege im Süden und Westen des Hühbeck. Diese Gebiete werden jährlich bei Hochwasser überflutet, soweit sie nicht eingedeicht sind. Infolge der regelmäßigen Überflutungen ist hier das Verbreitungsgebiet der jüngsten Sedimente mit Aue- und Hochflutlehm. Typisch für die Niederungen sind zahlreiche kleinere wassergefüllte Alt- oder Totarme, die ehemalige Wasserläufe nachzeichnen. Die Geländehöhen liegen vorwiegend zwischen 13 m NN und 17 m NN. Der tiefste Punkt ist 12 m NN im Nordwesten bei Dömitz im Mündungsbereich des Rhinowkanals in die Elbe.

2. Die Aufschotterungsebene der letzten Eiszeit (Urstromtal der Weichselkaltzeit)

Diese Landschaftsform nimmt den größten Flächenanteil im Untersuchungsgebiet ein. Es handelt sich hauptsächlich um den Bereich des Elbe-Urstromtals. Die Aufschotterung des Urstromtals durch die Elbe während der letzten Kaltzeit hat eine weitläufige Ebene hinterlassen, die zu den Rändern im Nordosten und Südwesten allmählich ansteigt. Die Ebene wird unterbrochen von den Niederungen der heutigen Elbe und ihrer Nebenflüsse und den Hochlagen der Geestinseln. Gegen Ende der letzten Kaltzeit bis in das Holozän hat sich außerhalb der Niederungen Flugsand abgelagert. Dieser Flugsand überdeckt als Dezimeter bis wenige Meter mächtige Decke oder in Form von einige Meter mächtigen Dünen und Dünenfeldern die Aufschotterungsebene. Der Flugsand bestimmt das heutige Relief, das im Bereich von Dünenfeldern besonders unruhig und kleinräumig strukturiert ist. Solche ausgedehnten Dünenfelder finden sich besonders im Gebiet der Gartower Tannen. Die Geländehöhe für diese Landschaftsform liegt im Untersuchungsgebiet vorwiegend zwischen 20 m NN und 30 m NN.

3. Die Geestinseln

Die Geestinseln liegen als isolierte Höhenrücken im Elbe-Urstromtal. Für das Untersuchungsgebiet sind dies die östlichen Ausläufer der Langendorfer Geest und vor allem der Höhbeck. Im Bereich der Geestinseln sind die ältesten Sedimente an der Geländeoberfläche zu finden. Es handelt sich dabei vorwiegend um Sedimente der Saale-Kaltzeit. Die Geländehöhe für diese Landschaftsform liegt im Untersuchungsgebiet vorwiegend zwischen 30 m NN und 50 m NN. Der Höhbeck bildet mit 76 m NN die höchste Erhebung.

101.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Im Nachweiszeitraum sind erhebliche Veränderungen der Erdoberfläche im Verlauf einer nächsten Kaltzeit zu erwarten. Dagegen werden die langfristig ablaufenden Prozesse wie Gebirgsbildung oder Epirogenese keine nennenswerten sicherheitsrelevanten Auswirkungen auf die Topografie im Betrachtungszeitraum haben.

Änderungen der Erdoberfläche beeinflussen Grundwasserspiegel, Grundwasserbewegung und Entwässerungssysteme.

101.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

101.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

101.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

101.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

101.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Eine Oberflächenmorphologie ist vorhanden; das FEP ist als Randbedingung gewiss.

Wirkung in den Teilsystemen: Merkmal der Erdoberfläche, das nur für das Teilsystem Deck-und Nebengebirge zu betrachten ist.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Von der Randbedingung geht keine Beeinträchtigung der Funktion einer Initial-Barriere aus.

101.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Erosion

Sedimentation

Diapirismus

Subrosion

Permafrost

Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Glaziale Rinnenbildung

Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges

Begründungen:

Erosion, Sedimentation: Durch die Erosion und die sich anschließende Ablagerung der Erosionsprodukte ändert sich die Ausgestaltung der Erdoberfläche. Erosions- und Sedimentationsort müssen nicht identisch sein.

Diapirismus: Wenn der Salzaufstieg entsprechend schnell ist und gegenüber der Salzablaugung dominiert, wird das Deckgebirge angehoben und damit die Topografie verändert.

Subrosion: Durch die Auflösung von Salzgestein kann es zu Erdfall- oder Dolinenbildungen kommen, was eine Veränderung der Topografie nach sich zieht.

Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung, Glaziale Rinnenbildung: Durch das Gefrieren des Grundwassers (Permafrost) ist mit einer Volumenzunahme verbunden, was zu neuen Landschaftsformen führen kann (z. B. Pingos). Exaration als Folge einer Inlandsvereisung führt zu neuen Geländeformen. Mit einem Gletschervorstoß und -rückzug sind die landschaftsverändernden Bildungen (Moränen) verbunden. Nicht vollständig verfüllte glaziale Rinnen bilden morphologische Senken.

Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges: Die wärmeerzeugenden Abfälle verursachen oberhalb der Einlagerungsbereiche eine geringe Hebung des Deckgebirges, was gegenüber dem erweiterten Standortbereich eine Veränderung der Topografie bedeutet.

Bemerkungen:

Gestrichen wird das FEP Deck- und Nebengebirge mit der Begründung „Die Deck- und Nebengebirgseigenschaften beeinflussen die Topografie“. Die Beeinflussung erfolgt über die Erosion.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Erosion

Sedimentation

Transgression oder Regression
Inlandvereisung in randlicher Lage
Vollständige Inlandvereisung
Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
Oberflächengewässer

Begründungen:

Erosion: Die Erosion (Raten) wird durch die Topografie beeinflusst (Wechselwirkung).

Sedimentation: Die Sedimentation ist von dem Vorhandensein von topografischen Hohlformen abhängig.

Transgression oder Regression: Die Topografie steuert den räumlichen Verlauf einer Transgression.

Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung: Die Topografie hat Einfluss auf die Ausbreitungsrichtung der Inlandvereisung.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Oberflächengewässer: Die Topografie beeinflusst direkt die Lage und Verbreitung der Oberflächengewässer. Darüber hinaus werden über die Grundwasserstandshöhen die Druckverhältnisse im Grundwasser und damit die Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge beeinflusst.

101.11 Offene Fragen

Keine.

101.12 Literaturquellen

Klinge, H., Boehme, J., Grisse mann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rüb el, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben.- Geol. Jb., C 71: 147 S.; Hannover.

Weiterführende Literatur:

Benda, L. (Hrsg.) (1995): Das Quartär Deutschlands. - 1. Aufl.: 408 S.; Berlin (Gebrüder Bornträger).

Eissmann, L. (1981): Periglaziäre Prozesse und Permafroststrukturen aus sechs Kaltzeiten des Quartärs. Ein Beitrag zur Periglazialgeologie aus der Sicht des Saale-Elbe-Gebietes. - Altenburger Naturwiss. Forsch., H. 1: 1-171; Altenburg.

Köhn, W. (1991): Die nacheiszeitliche Entwicklung der südlichen Nordsee. - Hannov. Geogr. Arbeiten, Bd. 45: 177 S.; Hannover.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72: 201 S.; Hannover.

102 Oberflächengewässer (2.3.04.01)

102.1 Definition/Kurzbeschreibung

Oberflächengewässer sind an der Landoberfläche frei anstehende Wassermengen wie beispielsweise Seen oder Flüsse.

102.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Oberflächengewässer des Norddeutschen Tieflandes bilden zusammen mit den oberflächennahen quartärzeitlichen Aquiferen ein einheitliches hydraulisches Regime. Geringe Reliefunterschiede in Verbindung mit hohen Versickerungskapazitäten der Geestflächen führen zu insgesamt geringen Oberflächenabflüssen und entsprechend hohen Grundwasserneubildungsraten. Die in den Geestgebieten neu gebildeten Grundwässer fließen in die Niederungsgebiete ab und treten dort in die Vorfluter über. In den Niederungsgebieten selbst übersteigt die Evapotranspiration aufgrund der geringen Flurabstände des Grundwassers die lokale Grundwasserneubildung. Exfiltrierendes Grundwasser trägt in erheblichem Umfang zum Oberflächenabfluss bei; in den sommerlichen Trockenperioden wird der Abfluss der Gewässer ausschließlich aus Grundwasser gespeist.

102.3 Sachlage am Standort

Größtes Oberflächengewässer ist die Elbe. Alle Nebenflüsse und Bäche sind auf diesen Vorfluter ausgerichtet. Im engeren Untersuchungsgebiet entwässert die Seege direkt in die Elbe. Weitere Zuflüsse von Bedeutung sind die Jeetzel und die Löcknitz. Die Jeetzel verläuft im Südosten des Untersuchungsgebietes näherungsweise in Süd-Nord-Richtung. Sie mündet weiter flussabwärts bei Hitzacker in die Elbe. Am Nordrand des Gebietes ist die in etwa parallel zur Elbe verlaufende Löcknitz der Hauptvorfluter für die Zuflüsse aus Nordosten. Die Löcknitz mündete ursprünglich im Süden von Dömitz in die Elbe. Im Rahmen von wasserbaulichen Erschließungsmaßnahmen wurde sie nach Norden hin in einen Kanal umgeleitet, der ca. 7 km westnordwestlich von Dömitz in die Elbe eintritt. Das natürliche Fließsystem ist durch wasserbauliche Maßnahmen stark verändert worden. Ein Netz von Gräben und Kanälen dräniert die Flussniederungen, um sie landwirtschaftlich dauerhaft zu nutzen. Im Süden und Südwesten

werden diese Dränagewässer durch den Luciekanal in die Jeetzel abgeführt. Im Nordosten ist die zwischen Elbe und Lößnitz gelegene Niederung durch Deiche vor Überflutungen geschützt. Da die Geländehöhen z. T. unter dem Niveau der Elbe liegen, ist eine ständige Entwässerung des Gebietes erforderlich. Sie erfolgt über ein System von Kanälen, die in den zentral gelegenen Rhinowkanal münden. Dessen Wasserstand wird über das Schöpfwerk Gaarz südlich von Dömitz künstlich geregelt.

Die Hochgebiete der Gartower Tannen, des Höhbeck und der Langendorfer Geest haben auffallend wenig Gewässer. Ursache ist die hohe Infiltrationskapazität der hier oberflächennah verbreiteten anstehenden Flug- und Schmelzwassersande. Die Niederschläge versickern hier sehr schnell. Die wenigen Gräben und Senken führen darüber hinaus nur zeitweise Wasser und fallen besonders in den Sommermonaten regelmäßig trocken.

Beispiele für Seen im Untersuchungsgebiet sind der Laascher See, der Gartower See und der Rudower See. Der Rudower See befindet sich direkt über der Salzstruktur Rabow. Seine Entstehung steht mit großer Wahrscheinlichkeit in Zusammenhang mit Subrosionsvorgängen an der Salzstruktur. Beim Laascher See in der Seegeniederung handelt es sich um eines der letzten größeren Hochwasser-Rückstaugebiete im Mittleren Elbetal. Der Gartower See ist ein künstlich angelegtes Gewässer, das in den neunzehnhundertsiebziger Jahren zur Förderung des regionalen Tourismus geschaffen wurde (Klinge et al. 2007).

102.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Die Lage und Verlauf der Oberflächengewässer spielen eine entscheidende Rolle für die Grundwasser-Strömungsvorgänge im Deckgebirge. Sie beeinflussen damit indirekt auch Subrosionsvorgänge sowie eine etwaige Ausbreitung von Schadstoffen. Eine erneute Kaltzeit wird zu einer Ausbildung von Permafrost führen, der die Grundwasserbewegung nachhaltig verändert. Dagegen wird Permafrost unter größeren Oberflächengewässern abgebaut bzw. nicht aufgebaut (Bildung von Taliki). Eine erneute Überfahung durch Inlandeis würde zu einer nachhaltigen Umgestaltung der Topografie ebenso wie des Gewässernetzes führen.

102.5 Zeitliche Beschränkung

Keine. Die heutigen Oberflächengewässer im Bereich des Standortes haben nur bis zu einer erneuten Überfahrung des Gebietes durch Inlandeis Bestand.

102.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

102.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

102.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

102.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Oberflächengewässer sind vorhanden und als Randbedingung gewiss.

Wirkung in den Teilsystemen: Oberflächenmerkmal, das nur für das Teilsystem Deck- und Nebengebirge zu betrachten ist.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Oberflächengewässer haben keine Beeinträchtigung einer Initial-Barriere zur Folge.

102.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Globale klimatische Veränderungen
Inlandvereisung in randlicher Lage
Vollständige Inlandvereisung
Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
Topografie

Begründungen:

Globale klimatische Veränderungen: Ein Klima mit entsprechenden Niederschlägen kann zur Bildung von Oberflächengewässern führen.

Topografie: Die topografische Ausgestaltung der Geländeoberfläche bestimmt die Lage und Form der Oberflächengewässer.

Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung: Eine Inlandvereisung kann die räumliche Verteilung und die Form von Oberflächengewässern beeinflussen. Das Eis kann z. B. als Stauriegel fungieren und den Abfluss von Oberflächengewässern verhindern oder in eine neue Richtung lenken.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Grundwasserströmung im Deckgebirge steht in direkter Wechselwirkung mit den Oberflächengewässern; in den sommerlichen Trockenperioden wird der Abfluss der Gewässer ausschließlich aus Grundwasser gespeist.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Erosion
Sedimentation
Permafrost
Inlandvereisung in randlicher Lage

Vollständige Inlandvereisung

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Erosion, Sedimentation: Erosion und Sedimentation werden durch die Wasserführung der Flüsse beeinflusst.

Permafrost: Unterhalb von Seen und Fließgewässern wird der Permafrost abgebaut.

Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung: Die Fließgeschwindigkeit des Inlandeises wird durch das Vorhandensein von Oberflächengewässern beeinflusst, indem die Reibung des Eises am Untergrund gemindert wird.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die Grundwasserströmung sowie die chemische Zusammensetzung der Grundwässer werden durch die Lage, den Verlauf der Oberflächengewässer sowie durch die gelösten Stoffe in den Oberflächengewässern beeinflusst.

102.11 Offene Fragen

Keine.

102.12 Literaturquellen

Klinge, H., Boehme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 71: 147 S.; Hannover.

Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. - Geol. Jb., C 72: 201 S.; Hannover.

103 Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

103.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter radioaktivem Zerfall versteht man die spontane, d.h ohne äußeren Anlass verlaufende, Umwandlung instabiler Atomkerne unter Abgabe einer charakteristischen ionisierenden Strahlung. Die Strahlung besteht aus Teilchen oder Photonen.

103.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Von den ca. 3.000 bekannten Nukliden sind weniger als 10 % stabil. Bei den übrigen Nukliden findet ein radioaktiver Zerfall statt. Sie werden daher auch als Radionuklide bezeichnet. Eine komplette Aufstellung aller bekannten Nuklide findet man in der Karlsruher Nuklidkarte (Magill et al. 2006).

Kennzeichnend für ein Radionuklid sind:

- seine Halbwertszeit,
- die Art der Strahlung (Alpha-, Beta- oder Gamma-Strahlung) sowie
- die abgegebene Energie.

Durch radioaktiven Zerfall entstehen Tochternuklide, die ihrerseits wieder zerfallen können, so dass eine Zerfallskette entsteht. Detaillierte Beschreibungen zu den Eigenschaften der Radionuklide und den Zerfallsreihen finden sich in der Fachliteratur (z. B. Lieser 1991, Adloff & Guillaumont 1993, Wiles 2002).

Sprachlich korrekt ist eher der Begriff "radioaktive Umwandlung", da ein echter Kernzerfall nur bei der Alpha-Strahlung und spontanen Spaltungen erfolgt (Stolz 2003).

103.3 Sachlage am Standort

Das Abfallinventar für die vorläufige Sicherheitsanalyse am Standort Gorleben ist in Peiffer et al. (2011) aufgeführt. Von den eingelagerten Radionukliden ist für die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers nur ein kleiner Teil von Interesse (Rimkus & Storck 1985):

- Radionuklide, die zum Zeitpunkt der Einlagerung in radiologisch bedeutsamen Mengen vorliegen und die eine ausreichend hohe Funktionsdauer haben,
- kurzlebige Radionuklide mit einer hohen Aktivität, deren Zerfall und die dadurch verursachten Temperaturen und Gasentwicklungen eine Freisetzung langlebiger Radionuklide ermöglichen könnte, und
- Aktiniden am Ende der Zerfallsreihen, die zwar zum Zeitpunkt der Einlagerung kaum vorhanden sind, die aber durch den Zerfall von Mutternukliden aufgebaut werden.

Die Relevanz eines Radionuklids hängt im Wesentlichen vom Anfangsinventar, von seiner Halbwertszeit, der Strahlungsart (Alpha-, Beta- oder Gamma-Strahlung) und der radiologischen Bewertung seiner Aktivität ab. Aber auch die physikalischen und chemischen Vorgänge im Nahfeld, in der Geosphäre und der Biosphäre spielen im Falle einer Freisetzung eine Rolle.

Die Auswahl der Radionuklide für eine Sicherheitsanalyse wird insgesamt so breit angelegt, dass für unterschiedliche Szenarien und Einlagerungskonzepte alle relevanten Radionuklide in der Auswahl enthalten sind. Zusammenstellungen von sicherheitsrelevanten Radionukliden geben z. B. Kienzler & Loida (2001).

103.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Durch den radioaktiven Zerfall ändert sich das Aktivitätsinventar im Endlager im Laufe der Zeit. Bei einzelnen Zerfallsprozessen, vor allem bei U-238, kann sich auch durch Aufbau von Tochternuklide die Gesamtaktivität erhöhen. Der Zerfall in stabile Isotope verringert dagegen die Gesamtaktivität. Insgesamt nimmt die Gesamtaktivität in einem Endlager schnell ab: Sowohl bei HAW-Kokillen als auch bei LWR-Brennelementen ist die Aktivität nach wenigen Hundert Jahren auf 1 % der Anfangsaktivität zurückgegangen (Rübel et al. 2004).

Durch den Zerfall wird Wärme produziert. Die beim Zerfall emittierte Strahlung kann außerdem zur Aktivierung und zur Radiolyse führen. Die entsprechenden Auswirkungen sind in den FEP Wärmeproduktion, Strahlungsinduzierte Aktivierung und Radiolyse beschrieben.

Emittierte Neutronen beeinflussen eine mögliche Kritikalität des radioaktiven Inventars (siehe FEP Kritikalität).

Die Matrix der Brennelemente ist durch den radioaktiven Zerfall direkt betroffen.

103.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

103.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

103.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

103.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

103.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Auf Grund der eingelagerten radioaktiven Abfälle ist der radioaktive Zerfall ein Prozess, der betrachtet werden muss.

Wirkung in den Teilsystemen: Auf Grund der eingelagerten Abfälle ist radioaktiver Zerfall im Nahfeld immer zu betrachten. Erfolgt ein Transport der eingelagerten Radionuklide in andere Teilsysteme, ist deren Zerfall auch dort von Bedeutung.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Der radioaktive Zerfall beeinflusst indirekt über mehrere FEP-Ebenen die Funktion der Initial-Barrieren (z. B. → Wärmeproduktion → Auflösung und Ausfällung). Ein Einfluss über mehrere Ebenen wird als "nicht zutreffend" klassifiziert. Ein indirekter Einfluss über die Radiolyse auf das Wirtsgestein ist nicht angegeben, da dieser Effekt, wenn überhaupt, nur in unmittelbarer Nähe (einige cm) eines Grubenbaus wirksam ist und die Integrität des Wirtsgesteins nicht beeinträchtigt (siehe FEP Radiolyse).

103.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Inventar: Radionuklide

Begründungen:

Inventar: Radionuklide: Der radioaktive Zerfall ist eine immanente Eigenschaft radioaktiver Stoffe.

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP:

Wärmeproduktion

Strahlungsinduzierte Aktivierung

Radiolyse

Begründungen:

Wärmeproduktion: Die Energie der beim radioaktiven Zerfall emittierten Strahlung wandelt sich durch Wechselwirkungen mit Materie in Wärme um.

Strahlungsinduzierte Aktivierung: Die beim radioaktiven Zerfall emittierten Neutronen werden von den Materialien in der Umgebung eingefangen, wodurch sich radioaktive Isotope bilden können.

Radiolyse: Die beim radioaktiven Zerfall emittierte Strahlung wirkt auf chemische Verbindungen ein (z. B. eine Dissoziation von Molekülen).

Bemerkungen:

Materialversprödung durch Strahlung ist nicht aufgeführt, da sie "nicht zu betrachten" ist.

Beeinflusste FEP:

Inventar: Radionuklide

Abfallmatrix

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Inventar: Radionuklide: Außer bei der Gammastrahlung ändern sich durch den radioaktiven Zerfall von radioaktiven Isotopen deren Kernladungszahl und damit auch das zu betrachtenden Inventar an Radionukliden. Bei einem Zerfall in ein stabiles Isotop entfällt es bei der Beschreibung des Inventars.

Abfallmatrix: Die Matrices der eingelagerten Abfälle werden durch den radioaktiven Zerfall verändert. So kann z. B. das Gefüge einer Matrix durch den alpha-Zerfall beeinflusst werden.

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Der Zerfall eines Radionuklids kann Auswirkungen auf seinen Transport haben. Bei einem Zerfall in ein stabiles Isotop entfällt es bei der Beschreibung des Radionuklidtransportes.

Radionuklidtransport in der Gasphase: Der Zerfall eines Radionuklids kann Auswirkungen auf seinen Transport haben. Bei einem Zerfall in ein stabiles Isotop entfällt es bei der Beschreibung des Radionuklidtransportes.

Bemerkungen:

Transportbeeinflussende Prozesse (Sorption, Komplexbildung, Kolloide) sind nicht aufgeführt, da der radioaktive Zerfall keinen Einfluss auf diese Prozesse hat. Erst bei der Betrachtung des Transportes eines bestimmten Radionuklids kann durch den radioaktiven Zerfall eine Beeinflussung erfolgen.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Außer bei der Gammastrahlung ändern sich durch den radioaktiven Zerfall von radioaktiven Isotopen deren Kernladungszahlen und somit auch die chemischen Eigenschaften. Der Einfluss ist aber gegenüber anderen Prozessen (z. B. Korrosionsprozesse) so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

Im Deck- und Nebengebirge ist die Relation zwischen freigesetzten Radionukliden und natürlich vorhandenen Isotopen ebenfalls so gering, dass auch hier kein Einfluss auf das hydrochemische Milieu mehr vorliegt.

103.11 Offene Fragen

Keine.

103.12 Literaturquellen

Adloff, J.-P., Guillaumont, R. (1993): Fundamentals of Radiochemistry. - CRC Press, Inc; Boca Raton, USA.

Kienzler, B., Loida, A. (2001): Endlagerrelevante Eigenschaften von hochradioaktiven Abfallprodukten - Charakterisierung und Bewertung - Empfehlungen des Arbeitskreises HAW-Produkte. - Wissenschaftliche Berichte FZKA 6651; Karlsruhe.

Lieser, K.H. (1991): Einführung in die Kernchemie. - Verlag Chemie; Weinheim.

Magill, J., Pfennig, G., Galy, J. (2006): Karlsruher Nuklidkarte. - 7. Auflage, Report EUR 22276 EN; Karlsruhe.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Rimkus, D., Storck, R. (1985): NuklidAuswahl für Aktivitätsinventare eines Endlagers hinsichtlich der Erfordernisse von Langzeitsicherheitsanalysen. - Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlussbericht; Berlin.

Rübel, A., Müller-Lyda, I., Storck, R. (2004): Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Endlagerung. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-203; Braunschweig.

Stolz, W. (2003): Radioaktivität: Grundlagen - Messung - Anwendungen. - 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Teubner Verlag; Stuttgart.

Wiles, D.R. (2002): The Chemistry of Nuclear Fuel Waste Disposal. Polytechnic International Press; Montreal.

104 Radionuklidmobilisierung (3.2.01.01)

104.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Mobilisierung von Radionukliden beschreibt den Übergang von Radionukliden aus dem Abfall in eine transportfähige flüssige Phase oder in eine Gasphase. Der damit verknüpfte Quellterm beschreibt die für den Transport unter Endlagerbedingungen zur Verfügung stehenden Radionuklide zeitlich und räumlich.

104.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Radionuklidmobilisierung umfasst die Freisetzung der Radionuklide aus der ursprünglichen Bindungsform in eine transportfähige Bindungsform und ist daher mit verschiedenen Korrosionsprozessen verbunden (siehe FEP-Beschreibungen Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails). Die Mobilisierung von Radionukliden kann somit schon vor der Einlagerung stattgefunden haben. Dies ist z. B. bei den Brennelementen der Fall, bei denen Radionuklide in die Gasphase des Gebindes freigesetzt worden sind. Solange die Behälter dicht sind, stehen diese mobilisierten Radionuklide allerdings nicht für einen Transport im Endlager zur Verfügung.

Bei der Beschreibung des Radionuklid-Quellterms wird einerseits berücksichtigt, dass die Radionuklide nach ihrer Mobilisierung nicht zwingend für einen Transport im Endlagersystem zur Verfügung stehen. So kann es nach der Mobilisierung zu einer Ausfällung der Radionuklide oder einer Sorption an Korrosionsprodukten kommen. Andererseits sind Radionuklide vorhanden, die quasi instantan bei Zutritt von Lösung oder bei Undichtigkeit des Behälters transportfähig werden. Dies wird als Instant Release Fraction (IRF) bezeichnet. Diese werden im Quellterm berücksichtigt. Die Mobilisierung von Radionukliden aus Brennelementen unterscheidet folgende Bestandteile (Johnson et al. 2005, Kienzler et al. 2012, Müller-Lyda & Rübel 2008):

1. Ein Teil der Spaltprodukte sammelt sich bevorzugt im Plenum der Brennelemente (Spaltgase und möglicherweise I-129), an den Korngrenzen, Klüften und Spalten der Brennstoffmatrix sowie im Zwischenraum zwischen den Brennstoff-Pellets und in Zwickeln zum Hüllrohr. Diese Radionuklide können bei Kontakt mit Lösung im

Endlager relativ schnell freigesetzt werden und in Lösung gehen (Instant Release Fraction). Einen hohen Anteil an dieser Fraktion haben z. B. Cs-137, Cs-135 und I-129. Einige Radionuklide liegen bereits gasförmig vor und können bei Verlust der Dichtigkeit aus den Abfallbehältern freigesetzt werden

2. Ein geringerer Teil der Radionuklide befindet sich in den Metallteilen wie Hülsen und Strukturteilen des Brennelements. Diese Radionuklide sind im Allgemeinen Aktivierungsprodukte, die während des Betriebs im Reaktor durch Neutroneneinfang und Folgeprozessen entstehen. Die Radionuklide werden im Endlager in der Regel kongruent mit der Korrosion aus den Metallteilen freigesetzt.
3. Der überwiegende Teil der Radionuklide ist in der Brennstoffmatrix fixiert und wird erst bei deren Auflösung freigesetzt. Bei den Brennelementen besteht die Abfallmatrix vorwiegend aus Urandioxid, aber auch aus Uran-Plutonium-Mischoxid, U_3Si_2 -/ UAl_x -Al-Legierungen oder Graphit. Die Matrixkorrosion ist stark abhängig von den geochemischen Bedingungen, insbesondere dem Redoxpotential (siehe FEP Korrosion der Brennstoffmatrix).

Für die verschiedenen Bestandteile der Brennelemente werden bei der Modellierung unterschiedliche Mobilisierungsraten angesetzt. Bei der Brennstoffmatrix werden die Matrix-gebundenen Radionuklide (u. a. Actiniden) entsprechend der Matrixkorrosionsrate mobilisiert. Bei den Metallteilen des Brennelementes wird der wesentliche Anteil während einiger hundert Jahre nach dem Ausfall des Behälters freigesetzt. Die Instant Release Fraction wird quasi instantan bzw. über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum nach dem Ausfall des Behälters freigesetzt.

Die Radionuklidmobilisierung aus einer Glasmatrix (HAW-Kokille und CSD-B) beruht im Wesentlichen auf der Korrosion der Glasmatrix (Grambow et al. 1999, 2001, Kienzler et al. 2000, 2012, Loida et al. 1999). Die Freisetzung der Radionuklide setzt mit der Auflösung der Glasmatrix ein. Die Korrosion führt dann zu einer Zunahme der Siliziumkonzentration in der Lösung. Nach Erreichen der Sättigungskonzentration für Silizium fällt die Korrosionsrate deutlich ab. Die anfängliche Rate der Glaskorrosion bis zum Erreichen der Siliziumsättigung ist vor allem von der Lösungszusammensetzung, der Temperatur, der Lösungsmenge und der Beschaffenheit der Glasoberfläche abhängig (siehe FEP Korrosion von Glas).

Viele aufgelöste Stoffe können auf Grund des herrschenden geochemischen Milieus wieder ausfallen und neue feste Phasen bilden, in denen Radionuklide fixiert werden.

Die Sekundärfestphasen der Korrosion von zementhaltigen Materialien können freigesetzte Radionuklide einbauen und dementsprechend zurückhalten (siehe FEP Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen).

Die Mobilisierung von Radionukliden aus den kompaktierten Hülsen und Strukturteilen der Brennelemente der Wiederaufarbeitung (CSD-C) kann analog zu den Metallteilen in den Brennelementen behandelt werden.

Da die Urantails u. a. leicht-lösliches UO_2F_2 sowie freie Flusssäure (HF) beinhalten, kann von einem erhöhten Radionuklidfreisetzungspotenzial aufgrund von Lösungsver-sauerung und hoher Löslichkeit ausgegangen werden. Der Kenntnisstand zur Mobilisierung von Radionukliden aus graphithaltigen Materialien unter Endlagerbedingungen ist gering.

104.3 Sachlage am Standort

Die Mobilisierung der Radionuklide erfolgt in den Einlagerungsorten bzw. den Abfällen. Die zu betrachtenden Abfalltypen sind

- bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren, Prototyp- und Forschungsreaktoren (direkte Endlagerung),
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe (HAW-Kokillen/CSD-V, CSD-B und CSD-C),
- verpresste Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung,
- graphithaltige Abfälle,
- Urantails aus der Urananreicherung sowie
- sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

Ein wesentlicher Prozess der Radionuklidmobilisierung ist die Korrosion von Abfallmatrices (siehe FEP Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails, Metallkorrosion (CSD-C), Zersetzung von Organika. Die Korrosion hängt entscheidend vom geochemischen Milieu ab und hat auch standortspezifische Auswirkungen.

104.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Beschreibung der Mobilisierbarkeit der Radionuklide ist unter Berücksichtigung des geochemischen Milieus (inklusive der Betrachtung der Löslichkeiten der Radionuklide und Sorptionsmöglichkeiten) die Voraussetzung für die Ableitung eines Radionuklid-Quellterms. Der Radionuklid-Quellterm legt die zeitlich veränderliche Konzentration der transportierbaren Radionuklide in einem Einlagerungsbereich fest. Zusammen mit den Volumenströmen der Flüssigkeit und des Gases in den Grubenbauen bestimmt er die Anfangsströme der Radionuklide (siehe auch FEP Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und Radionuklidtransport in der Gasphase), die möglicherweise auch C-14 und I-129 enthalten.

Hochradioaktive Abfallprodukte (z. B. bestrahlte Brennelemente) enthalten Spaltgase und andere volatile Radionuklide. Diese volatilen Radionuklide können unmittelbar nach Verlust der Behälterdichtigkeit - auch ohne Lösungszutritt - mobilisiert werden. Diese ist insbesondere relevant für fehlerhaft produzierte Brennelement-Behälter.

104.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

104.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

104.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

104.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

104.9 Begründungen:

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung: Unter der Voraussetzung, dass Lösung die Abfälle erreicht oder Gase aus den Abfällen freigesetzt werden, findet eine Mobilisierung von Radionukliden im Teilsystem Nahfeld statt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Mobilisierung von Radionukliden hat keinen Einfluss auf die Initial-Barrieren.

104.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Versagen eines Brennelement-Behälters

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Begründungen:

Versagen eines Brennelement-Behälters: Für den Fall des Versagens eines Brennelement-Behälters (Undichtigkeit) kommt es zwangsläufig zur Freisetzung von Spaltgasen und anderen volatilen Radionukliden.

Korrosion der Brennstoffmatrix: Die Korrosion der Brennstoffmatrix, dem Stoff in den die Radionuklide eingebunden sind, führt zwangsläufig zur Mobilisierung von Radionukliden.

Korrosion von Glas: Die Korrosion der Glasmatrix, dem Stoff in den die Radionuklide eingebunden sind, führt zwangsläufig zur Mobilisierung von Radionukliden.

Beeinflussende FEP:

Inventar: Radionuklide

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

Zersetzung von Organika

Komplexbildung

Begründungen:

Inventar: Radionuklide: Bestimmt das Ausmaß der Mobilisierung.

Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails: Bei der Korrosion von graphithaltigen Materialien und Urantails werden Radionuklide freigesetzt; neben graphithaltigen Materialien, die Radionuklide enthalten, sollen auch inaktive graphithaltige Materialien eingelagert werden - insofern führt die Korrosion graphithaltiger Materialien nicht zwangsläufig zur Radionuklidmobilisierung.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Bei der Korrosion von zementierten Abfallprodukten werden Radionuklide freigesetzt.

Komplexbildung: Beeinflusst die Konzentration von Radionukliden in Lösung und dadurch die Mobilisierungsrate, bspw. Rate der Actinidenmobilisierung aus der UO₂-Brennstoffmatrix.

Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters: Ein Behälterausfall kann bei Vorhandensein volatiler Radionuklide zu einer Mobilisierung führen. (Das Versagen eines Brennelement-Behälters wird als auslösenden FEP betrachtet, da es in diesem Fall zwangsläufig zur Freisetzung von Spaltgasen kommen wird.)

Lösungen im Grubenbau: Die Menge an vorhandenen Lösungen beeinflusst das Ausmaß einer Mobilisierung von Radionukliden in die Lösung.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Radionuklidmobilisierung wird sowohl in der Reaktionskinetik als auch in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst, u. a. von Konzentrationen der Haupt- und Spurenbestandteile der Lösungen, pH-Wert, Redoxpotential, Ionenstärke.

Metallkorrosion: Werden entsprechende Materialien als Abfallmatrix verwendet führen diese Korrosionsprozesse zu einer Mobilisierung der Radionuklide.

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme: Eine Veränderung der Zirkaloy-Hüllrohre der Brennelemente kann die Mobilisierung von Radionukliden aus den Hüllrohren beeinflussen.

Bemerkungen:

Wärmeproduktion: Beeinflusst die Radionuklidmobilisierung indirekt über die angegebenen Korrosionsprozesse.

Fluiddruck: Ist unter Endlagerbedingungen zu vernachlässigen.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Inventar: Radionuklide

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Inventar: Radionuklide: Durch die Mobilisierung verringert sich das am Einlagerungsort vorhandene Inventar.

Radionuklidtransport: In der Regel erfolgt nach der Mobilisierung auch ein Transport von Radionukliden.

Bemerkungen:

Geochemische Milieu im Grubenbau: Mit Ausnahme von Uran, das aus Urantails mobilisiert werden kann, führt die Mobilisierung von Radionukliden zu Konzentrationsänderungen in geringen Umfang und somit zu einem vernachlässigbaren Einfluss auf das geochemische Milieu.

104.11 Offene Fragen

- Mobilisierung aus abgebrannten Brennelementen der Hochtemperaturreaktoren und Forschungsreaktoren
- Mobilisierung aus Urantails (U_3O_8)
- Einfluss der Temperatur auf Radionuklidmobilisierung
- Radionuklidmobilisierung aus CSD-C Abfällen, aus den Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, aus graphithaltigen Abfällen (AVR, THTR)
- Einfluss hoher Abbrände, z. B. auf die IRF

104.12 Literaturquellen

Grambow, B., Bernotat, W., Kelm, M., Kienzler, B., Luckscheiter, B. (1999): HAW-Glas: Auslaugverhalten und Freisetzung von Radionukliden. - INE/FZK 07/99; Karlsruhe.

Grambow, B., Müller, R. (2001): First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment. - Journal of Nuclear Materials, Vol. 298: 112-124.

Johnson, L., Ferry, C., Poinssot, C., Lovera, P. (2005): Spent fuel radionuclide source-term model for assessing spent fuel performance in geological disposal. Part I: Assessment of the instant release fraction. - Journal of Nuclear Materials 346: 56-65.

Kienzler, B., Schüssler, W., Metz, V. (2000): Quellterme für HAW-Glas, abgebrannten Kernbrennstoff und zementierte Abfälle. - Zusammenfassender Bericht, INE/FZK 05/00; Karlsruhe.

Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V. (2012): Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste), Als Bericht KIT-INE 003/11 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, KIT-SR 7624, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE); Karlsruhe

Loida, A., Grambow, B., Kelm, M. (1999): Abgebrannter LWR-Kernbrennstoff: Auslaugverhalten und Freisetzung von Radionukliden. - FZK-INE 09/99, vorläufiger Abschlussbericht, unveröffentlicht; Karlsruhe.

Loida, A., Luckscheiter, B., Kienzler, B. (1999): Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement. - FZK-INE 012/99; Karlsruhe.

Müller-Lyda, I., Rübel, A. (2008): Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Anhang Behälterstandzeiten: Langzeitstabilität von Behältermaterialien und Abfallmatrix. - Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Anhang zu GRS-247; Braunschweig.

105 Sorption und Desorption (3.2.03.01)

105.1 Definition/Kurzbeschreibung

Kondensierte Phasen (Flüssigkeiten und Festkörper) können aus ihrer Umgebung Fremdmoleküle aufnehmen. Dieser Vorgang wird als Sorption bezeichnet. Der aufzunehmende Stoff (Sorptiv) kann dabei in das Innere der kondensierten Phase (Sorbens) eindringen oder sich an seiner Grenzfläche anreichern. Der Umkehrprozess zur Sorption wird Desorption genannt.

105.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Erfolgt eine Anreicherung des Sorptivs an der Grenzfläche des Sorbens, dann handelt es sich um Adsorption. Die Anreicherung im Inneren des Sorbens wird als Einbau (Inkorporation) bezeichnet. Das Eindringen und die Verteilung des Sorptivs im Volumen des Sorbens wird als Sorption im weiteren Sinne verstanden.

Verschiedene chemische/physikalische Prozesse sind Grundlage der Sorption, wie

- Adsorption,
- Absorption,
- Ionenaustausch,
- Oberflächenausfällung und
- Einbauprozesse.

Diesen Reaktionen liegen Wechselwirkungen zwischen dem Sorptiv und den (Oberflächen-) Eigenschaften des Sorbens zu Grunde. Die Eigenschaften vieler Oberflächen sind abhängig vom geochemischen Milieu, die je nach pH negative oder positive Ladungen besitzen können. Die Speziation (Ladungszustand, etc.) der Radionuklide hängt ebenfalls vom jeweiligen geochemischen Milieu ab. Daher ergibt sich, dass die Sorption von Radionukliden stark pH abhängig ist. Weitere Einflussgrößen sind die Art des Sorbens, die Ionenstärke, die Temperatur und die Konzentration von Liganden und konkurrierenden Spezies (Altmaier et al. 2004).

Im Allgemeinen wird die Sorption anhand von Gleichgewichtsprozessen beschrieben, in denen die gelöste und die sorbierte Konzentration des betrachteten Sorptivs im chemischen Gleichgewicht miteinander stehen. Ändert sich die Konzentration des Sorptivs ändert sich auch die sorbierte Konzentration an der Oberfläche. Allerdings weisen Sorptions- und Desorptionsreaktionen eine Kinetik auf, die sehr unterschiedlich sein kann.

In einfachen Modellen wird das Gleichgewicht zwischen gelöster und sorbierter Konzentration, welches sich bei nicht zu schnellen Strömungen unter isothermen Bedingungen einstellt mit Hilfe von Sorptionsisothermen beschrieben. Man unterscheidet dabei zwischen linearen Sorptionsmodellen nach dem K_d -Konzept (Henry-Isotherme) oder nichtlinearen Sorptionsmodellen mit Langmuir- oder Freundlich-Isothermen (z. B. Stumm & Morgan 1996). Diese Isothermen sind im Modell nur anwendbar, wenn die Systemeigenschaften wie pH, Ionenstärke, Anzahl von Sorptionsplätzen, etc. denjenigen der zu Grunde liegenden Messwerte entsprechen (Stumm & Morgan 1996).

105.3 Sachlage am Standort

An Salzgestein ist Sorption von Radionukliden meist sehr gering. Die Kristall- bzw. Ionenstruktur des Halits bindet die Valenzelektronen innerhalb des Kristalls stark. Feste Phasen aus Molekülen mit kovalenter Bindung, haben geringere Wechselwirkungskräfte zwischen den Molekülen. Durch die Fixierung der Elektronen in den kovalenten Bindungen bilden sich an den Grenzflächen zur Lösung Potentiale aus, welche zu stärkerer Sorption führen können.

Da Salzgrus als Versatz verwendet wird, spielt Sorption in den versetzten Strecken eine untergeordnete Rolle bei der Rückhaltung von Radionukliden. Das Sorptionsvermögen von nichtkompaktierbarem Versatz (Schotter) oder an Sand (verwendet zur Verfüllung von Bohrlöchern) ist vermutlich vernachlässigbar. Am Standort Gorleben kann die Sorption von Radionukliden an Sekundärphasen, die sich auf alterierten Abfallmatrices bilden (z. B. Tonminerale an alterierten HAW-Glas), an Behälterkorrosionsprodukten (z. B. Magnetit) und Mineralphasen von Verschlussbauwerken (z. B. Sorelphasen) im Nahfeld sowie an verschiedenen Mineralphasen in Deckgebirgsschichten (z. B. Tonminerale und Fe-Oxid-/Hydroxidphasen) eine wichtige Rolle spielen. Zur Sorption im Deckgebirge am Standort Gorleben existiert eine umfangreiche Datenbasis. Eine zusammenfassende Darstellung gibt z. B. Suter, Biehler et al. (1998).

Starke Sorption findet an Materialien mit Zement- oder Sorelphasen sowie deren Korrosionsprodukten statt. Die Sorptionsfähigkeit von Bentonit des Schachtverschlusses hängt von mehreren Faktoren ab, u. a. dessen Positionierung innerhalb des Schachtverschlusses und den Lösungen im Kontakt. In experimentellen Arbeiten zur Sorption an Bentonit in Kontakt mit Salzlösungen wurden eine geringe Sorption beobachtet (z. B. Hofmann et al. 2004).

105.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die verschiedenen Radionuklide zeigen deutliche Unterschiede in der Sorption: Mehrwertige Kationen, speziell tri- und tetravalente Actiniden werden von vielen Materialien stark sorbiert, wie z. B. an Materialien aus Zement oder Sorelphasen. Einwertige Kationen, z. B. Cs-135, sorbieren deutlich schwächer, aber können einen Ionenaustausch eingehen. Anionische Spezies (z. B. von C-14, Cl-36, I-129, Se-79) werden gegenüber den Kationen in wesentlich geringerem Maß sorbiert. Die Sorption von Radionukliden wurde - von wenigen Ausnahmen (z. B. Hofmann et al. 2004, Lützenkirchen et al. 2003, Metz et al. 2011) ausgenommen - lediglich in verdünnten Lösungen untersucht. Da der Kenntnisstand zur Sorption unter salinaren Bedingungen bisher sehr gering ist, wird hauptsächlich die Radionuklidsorption an Gesteinen des Deckgebirges berücksichtigt. Die Sorption im Nahfeld an Materialien mit Zement oder Sorelphasen oder den unterschiedlichen Korrosionsprodukten (z. B. korrodierten Behältermaterialien) ist signifikant. Diese ist jedoch bisher nicht belastbar quantifiziert. Sorption kann zu einer Rückhaltung von Radionukliden im Endlager beitragen.

105.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

105.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

105.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

105.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

105.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung: Sorptionsprozesse finden in allen Teilsystemen statt.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Sorption und Desorption hat Einfluss auf den Radionuklidtransport, aber es erfolgt keine Beeinträchtigung einer Initial-Barriere.

105.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Metalle

Inventar: Sonstige Stoffe

Abfallmatrix

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Versatz

Verschlussmaterial

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Bohrlochverrohrung

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Metallkorrosion

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Wirtsgestein
Deck- und Nebengebirge
Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Kolloide
Komplexbildung
Radionuklidtransport in der flüssigen Phase
Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Transport-FEP: Die Transport-FEP bestimmen die verfügbaren Radionuklide, die Sorptionsprozessen unterliegen können.

Inventar: Metalle, Inventar: Sonstige Stoffe, Abfallmatrix, Brennelement-Behälter: Sorption von Radionukliden z. B. an Behälterkorrosionsprodukten (z. B. Magnetit) ist von Bedeutung.

Sonstige Endlagerbehälter: Sorption von Radionukliden an Behälterkorrosionsprodukten (z. B. Magnetit) ist von Bedeutung.

Versatz, Verschlussmaterial: Sorption von Radionukliden an Mineralphasen von Verschlussbauwerken (z. B. Sorelphasen) ist von Bedeutung.

Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften: Die Sorptionseigenschaften aller ins Endlager eingebrachten Stoffe werden berücksichtigt.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Sorptionsprozesse sind abhängig vom geochemischen Milieu.

Metallkorrosion: Sorption von Radionukliden an Behälterkorrosionsprodukten (z. B. Magnetit) wird durch die Kinetik bzw. dem Ausmaß der Metallkorrosion beeinflusst.

Korrosion von Glas: Sorption von Radionukliden an Sekundärphasen, die sich auf alterierten Abfallmatrices bilden (z. B. Tonminerale an alterierten HAW-Glas) ist von Bedeutung.

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: Sorption von Radionukliden an Sekundärphasen, die sich auf alterierten Abfallmatrices bilden (z. B. Zementkorrosionsprodukten und Mineralphasen von Verschlussbauwerken (z. B. Sorelphasen) sind von Bedeutung.

Deck- und Nebengebirge: Sorption von Radionukliden an verschiedenen Mineralphasen in Deckgebirgsschichten (z. B. Tonminerale und Fe-Oxid-/Hydroxidphasen) sind von Bedeutung.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Sorptionsprozesse sind abhängig von den herrschenden chemischen Verhältnissen. Kolloide

Komplexbildung: Potenziell sorptionsfähige Stoffe können komplexiert werden. Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Transport in der flüssigen Phase bestimmt die verfügbaren Radionuklide, die Sorptionsprozessen unterliegen können.

Radionuklidtransport in der Gasphase: Transport in der Gasphase bestimmt die verfügbaren Radionuklide die Sorptionsprozessen unterliegen können.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Kolloide

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Kolloide: Angelagerte Stoffe können das chemische Verhalten von Kolloiden verändern, Kolloide können auch selbst sorbiert werden.

Transport-FEP: Sorptionsprozesse ermöglichen eine Rückhaltung von Radionukliden.

Bemerkungen:

Der Einfluss der Sorption auf das geochemische Milieu ist in der Regel von untergeordneter quantitativer Bedeutung.

Behälter: Der Einfluss der Sorption auf die Oberflächeneigenschaften der Behälter wird nicht berücksichtigt.

105.11 Offene Fragen

- Bessere Bestimmung des Sorptionsverhaltens einiger Radionuklide bzw. der Elemente und deren anionischen und kationischen Verbindungen, z. B. Iod
- Weiterentwicklung von Oberflächenkomplexmodellen zur Beschreibung der Sorption in natürlichen Systemen (Absicherung von K_d -Werten und deren Bandbreiten)
- Einfluss der Temperatur auf Sorption und Desorption unter salinaren Bedingungen
- Quantifizierung der Sorption von Radionukliden an Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Untersuchung des Sorptionsverhaltens anionischer Radionuklidspezies
- Entwicklung von Oberflächenkomplexierungsmodellen zur Beschreibung von Sorption und Desorption unter salinaren Bedingungen

105.12 Literaturquellen

Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, B., Kienzler, B., Marquardt, C., Neck, V., Richter, A. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. - Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlussbericht, FZK-INE 002/04; Karlsruhe.

Hofmann, H., Bauer, A., Warr, L.N. (2004): Behavior of smectite in strong salt brines under conditions relevant to the disposal of low- to medium-grade nuclear waste. *Clays and Clay Minerals* 52: 14-24.

Lützenkirchen, J., Metz, V., Kienzler, B., Vejmelka, P. (2003): Site specific sorption data for the Asse salt mine. CD-ROM Conference Proceedings of the 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Oxford, England, Publ. 4621: 1-7.

Metz, V., Bohnert, E., Kienzler, B., Garbev, K., Bauer, A., Bender, K., Bube, C., Hilpp, S., Moisei-Rabung, S., Lützenkirchen, J., Plaschke, M., Schlieker, M., Schild, D., Soballa, E., and Walschburger, C., 2011. Studie zur Abschätzung der standortspezifischen Pu- und Am-Rückhaltung (Schachanlage Asse II). BfS-Projekt Experimentelle Überprüfung der Abschätzung kammer-spezifischer Pu- und Am-Konzentrationen für die Schachanlage Asse II. Abschlussbericht. Karlsruhe Institut für Technologie; Karlsruhe.

Stumm, W., Morgan, J.J. (1996): Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters. John Wiley & Sons; New York.

Suter, D., Biehler, D., Blaser, P., Hollmann, A. (1998): Derivation of a Sorption Data Set for the Gorleben Overburden. Proc. DisTec 98 International Conference on Radioactive Waste Disposal, S. 581-584, Hamburg, September 9-11, 1998.

Weiterführende Literatur:

Brasser, T., Mönig, J., Scherschel, C., Veerhoff, M. (2002): Sorptionsdatenbank SODA -Datenbank zur Bestandsaufnahme und Bewertung geochemischer Informationen zum Verhalten von Abfallinhaltsstoffen im Deckgebirge einer UTD/UTV. GRS-182; Braunschweig.

Reiche, T., Becker, D., Buhmann, D., Lauke, T. (2011): Anpassung des Programmpakets EMOS an moderne Softwareanforderungen. ADEMOS - Phase 1. - GRS-A-3623; Braunschweig.

106 Kolloide (3.2.04.01)

106.1 Definition/Kurzbeschreibung

Kolloide sind Teilchen oder Tröpfchen, die in einem anderen Dispersionsmedium (Feststoff, Gas oder Flüssigkeit) fein verteilt vorliegen. Das einzelne Kolloid hat typischerweise einen Durchmesser zwischen 1 Nanometer und 1 Mikrometer. Kolloide werden über ihre Größe definiert und stellen keine einheitliche Stoffklasse dar. Kolloidale Systeme stellen einen Zwischenzustand der beiden Grenzfälle einer homogenen (einphasigen) Mischung und einer heterogenen (mehrphasigen) Mischung dar.

106.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Generell unterscheidet man zwischen hydrophilen und hydrophoben Kolloiden. Bei hydrophilen Kolloiden handelt es sich meist um Polymere, Polyelektrolyte oder Proteine, die gut löslich sind, spontan ein Sol bilden und relativ unempfindlich auf Destabilisierung durch Elektrolytzusatz reagieren. Im Falle von Metalloxiden/-hydroxiden, die eine geringe Löslichkeit besitzen, hat man es zumeist mit hydrophoben Kolloiden zu tun. Hydrophobe Kolloiddispersionen sind im Wesentlichen nur infolge ihrer Oberflächenladung stabilisiert und besitzen eine hohe Sensitivität gegenüber Elektrolytdestabilisierung. Hydrophobe Kolloide können zusätzlich sterisch stabilisiert werden, wenn Polyelektrolyte wie z. B. Huminstoffe an der Oberfläche sorbieren und einen Kontakt der hydrophoben Oberflächen, der zur Agglomeration führen kann, verhindern.

Radionuklide können an Kolloide gebunden sein. Auch können sich Kolloide aus Radionuklidphasen durch Agglomeration bilden. Deshalb wird unterschieden zwischen Eigenkolloiden, bei denen das Radionuklid einen Hauptbestandteil darstellt, z. B. in polymeren Actinidhydroxiden/oxiden, und Fremdkolloiden (Pseudokolloiden), bei denen das Radionuklid an aquatische Kolloide sorbiert bzw. darin eingebaut vorliegt. In Abhängigkeit vom geochemischen Milieu, insbesondere vom pH und von der Ionenstärke der Lösungen, können solche Kolloide langfristig metastabil vorkommen und die Speziation bestimmter Radionuklide dominieren (Altmaier et al. 2004a, Kim et al. 2001). Die Bildung von Eigenkolloiden ist für vierwertige Actiniden von großer Bedeutung. Diese Eigenkolloide stehen, wie in Altmaier et al. (2004b) beschrieben, im Gleichgewicht mit entsprechenden Actinidfestphasen. Werden die Kolloide, wie im Fall eines Transports aus dem Nahfeld, aus dem Gleichgewicht mit den Festphasen entfernt,

stellen sie keine stabilen und somit keine migrierenden Spezies dar. Die Löslichkeit wird unter diesen Bedingung durch nicht-kolloidale Actinid(IV)spezies bestimmt.

Geochemische Bedingungen wie z. B. niedrige Ionenstärke und hoher pH-Wert begünstigen das Entstehen kolloidaler Lösungen. Generell nimmt die Stabilität der Kolloide mit Zunahme der Ionenstärke ab.

Einbau in bzw. Sorption an Kolloide mit großer spezifischer Oberfläche hält solche Radionuklide wie z. B. die Actiniden Pu und Am in Lösung, die wegen ihrer starken Sorptionseigenschaften bzw. ihrer geringen Löslichkeit geringere Konzentrationen aufweisen sollten.

106.3 Sachlage am Standort

Die Quantifizierung der Kolloide im Nahfeld des Standorts Gorleben wurde theoretisch und experimentell untersucht (Geckeis et al. 2001). Kolloide der so genannten Gorleben Einschlusslauge, eine $MgCl_2$ -reiche Lösung aus einem Laugeneinschluss im Erkundungsschacht des Salzstocks Gorleben, wurden quantifiziert. Bei den festgestellten Kolloiden handelt es sich jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit nicht um ursprünglich vorhandene Kolloide, sondern um Fe(III)oxidhydratpartikel, die trotz anaerober Behandlung der Proben durch Kontakt geringster Sauerstoffmengen mit der Lauge erzeugt wurden (Geckeis et al. 2001). Die experimentellen Untersuchungen zur Kolloidbildung bei der Brennstoff- und Glaskorrosion in synthetischen Salzlösungen und einer realen Gorleben Einschlusslauge zeigten deutlich geringere Kolloidkonzentrationen im Vergleich zu kolloidalen Systemen niedriger Salinität (Geckeis et al. 1999).

Die Bindung von Radionukliden an Sorelphase-Fremdkolloide in Salzlösungen wurde für vierwertige Actiniden intensiv untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Sorption der Actiniden gleichermaßen an festen und kolloidal gelösten Sorelphasen stattfindet. Dementsprechend ist die durch Fremdkolloide von Sorelphasen hervorgerufene Actinid Konzentration in Lösung umgekehrt proportional zur Menge an festen Sorelphasen pro Lösungsvolumen. Die Actinid-Sorelphasen-Kolloide sind nur dann stabil, wenn gleichzeitig auch feste Sorelphasen vorhanden sind. Im Falle einer Verdünnung einer konzentrierten $MgCl_2$ -Lösung oder in einer NaCl-Lösung sind weder feste noch kolloidale Sorelphasen stabil. Daraus folgt, dass mit Entfernung von Bauwerken aus Sorelphasen die Actinid-Sorelphasen- Kolloide instabil werden (Altmaier et al. 2004b).

Das Vorkommen von Huminstoffkolloiden in Formationswässern im Deckgebirge kann für den kolloidalen Radionuklidtransport relevant werden (Kim et al. 1991). Die Sedimente, die den Salzstock überlagern, enthalten Grundwässer, die einen hohen Gehalt an kolloidalen Huminstoffen aufweisen. Die Huminstoffe werden kontinuierlich mit dem Grundwasser transportiert und aus Ligniten nachgebildet.

106.4 Standortsspezifische Auswirkungen

Die in Lösungen vorhandenen kolloidalen Partikel können Radionuklide anlagern und deren Transport beeinflussen (Stumm & Morgan 1996). Die Wechselwirkungen zwischen Kolloiden und der Feststoffmatrix können durch die Kombination verschiedener Prozesse beschrieben werden, wie Scherkräfte, scherkraft abhängige Anlagerung, Sedimentation und Diffusionsprozesse (Ryan & Elimelech 1996). Aufgrund der elektrostatischen Abstoßung kann die advective Geschwindigkeit von Kolloiden größer sein als die Abstandsgeschwindigkeit des Fluids, da die Fluidgeschwindigkeit innerhalb eines Porenkanals mit Annäherung an die Porenwände abnimmt. Aufgrund der Größe der Kolloide bewegen sich diese aber bevorzugt im mittleren Bereich des Porenkanals. Ergebnisse aus Experimenten zur Stabilität von Modellkolloiden zeigten, dass Metalloxyd-kolloide in konzentrierten Salzlaugen instabil sind und agglomerieren. Aufgrund rein kinetischer Überlegungen können jedoch selbst in Salzlaugen in Zeiträumen, wie sie in Laborexperimenten betrachtet werden, noch messbare Kolloidkonzentrationen verbleiben. In Zeiträumen, wie sie für die Endlagerung relevant sind, ist im Nahfeld aufgrund der niedrigen Konzentrationen kein wesentlicher Beitrag zum Radionuklidtransport zu erwarten.

106.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

106.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

106.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

106.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

106.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung: Kolloide können in allen Teilsystemen auftreten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Kolloide können den Radionuklidtransport beeinflussen, haben aber keinen Einfluss auf Initial-Barrieren.

106.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Sonstige Stoffe

Verschlussmaterial

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Zersetzung von Organika

Deck- und Nebengebirge

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Sorption und Desorption
Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Begründungen:

Inventar: Sonstige Stoffe, Verschlussmaterial, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: ergibt sich aus Beschreibung.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Stabilität von Kolloiden wird u. a. durch die Konzentrationen der Hauptbestandteile der Lösungen bzw. der Dichte/Ionenstärke beeinflusst. Die Bildung von Actinid-Eigenkolloiden hängt außerdem von Redoxpotential und vom pH-Wert ab (z. B. sind vierwertige Actinid-Eigenkollide unter reduzierenden Bedingungen stabil).

Metallkorrosion: Bildung von Fe^{2+} - Ionen, siehe Beschreibung.

Korrosion von Materialien mit Zement- und Sorelphasen: Actinid-Sorelphasen-Kolloide sind stabil, wenn gleichzeitig auch feste Sorelphasen vorhanden sind. Im Falle einer Verdünnung einer konzentrierten MgCl_2 -Lösung oder in einer NaCl -Lösung ist weder feste noch kolloidale Sorelphase stabil. Details siehe Beschreibung.

Zersetzung von Organika: Liefern Ausgangsmaterialien für Kolloidbildung. Kohlenwasserstoffvorkommen im Salz: analog zu Organika

Deck- und Nebengebirge: Huminstoffe in den Sedimenten des Deck- und Nebengebirges liegen in kolloidaler Form vor.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Die hydrochemischen Verhältnisse sind wichtig für die Stabilität der Kolloide.

Sorption, Desorption: Durch Anlagerung von Stoffen können die Eigenschaften der Kolloide verändert werden, Kolloide können auch selbst sorbiert werden.

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Menge an Radionukliden, die an Kolloiden angelagert werden können.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Sorption und Desorption

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Begründungen:

Sorption und Desorption: Wechselwirkungen von Kolloiden mit Radionukliden; z. B. Sorption von vierwertigen Actiniden gleichermaßen an feste und kolloidal gelöste Sorptionsphasen.

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Transport von an Kolloiden angelagerten Radionukliden

106.11 Offene Fragen

- Beitrag der Kolloide zur Gesamtkonzentration an Radionukliden in Lösungen, vor allem bei den Actiniden
- Übertragbarkeit von Laborexperimenten auf großräumige heterogene Systeme
- Temperatureinfluss auf Kolloidbildung (geringe Relevanz)

106.12 Literaturquellen

Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, B., Kienzler, B., Marquardt, C., Neck, V., Richter, A. (2004a): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. - Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlussbericht, FZK-INE 002/04; Karlsruhe.

Altmaier, M., Neck, V., Fanghänel, T. (2004b): Solubility and colloid formation of Th(IV) in concentrated NaCl and MgCl₂ solutions. Radiochimica Acta 92: 537-543.

Artinger, R., Rabung, T., Kim, J.I., Sachs, S., Schmeide, K., Heise, K.H., Bernhard, G., Nitsche, H. (2002): Humic colloid-borne migration of uranium in sand columns. J. Contam. Hydrol. 58: 1-12.

Artinger, R., Schüßler, W., Schaefer, T., Kim, J.I. (2002): A kinetic study of Am(III)/humic colloid interactions. *Environmental Science & Technology* 36: 4358-4363.

Buckau G., Artinger, R., Fritz, P., Geyer, S., Kim, J.I., Wolf, M. (2000): Origin and mobility of humic colloids in the Gorleben aquifer system. *Applied Geochemistry*, Volume 15, Number 2: 171-179.

Geckeis, H., Knopp, R., Rabung, T., Görtzen, A. (2001): Erstellung eines integrierten Nahfeldmodells von Gebinden hochaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben: geochemisch fundierter Quellterm für HAW-Glas, abgebrannte Brennelemente und Zement: Kolloide im Nahfeld. - Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum, Karlsruhe FZK-INE 007/01; Karlsruhe.

Kim, J.I., Rhee, S.D., Buckau, G. (1991): Complexation of Am(III) with humic acids of different origins. - *Radiochim. Acta* 52/53: 49-55.

Kim, J.I., Gompper, K., Geckeis, H. (2001): Forschung zur Langzeitsicherheit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. In: B. Kuczera (Editor), *Radioaktivität und Kernenergie*. Forschungszentrum Karlsruhe; Karlsruhe: 118-129.

Ryan, J.N., Elimelech, M. (1996): Colloid Mobilization and Transport in Groundwater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 107: 1-56.

Schäfer T., Artinger, R., Dardenne, K., Bauer, A., Schuessler, W., Kim, J.I. (2003): Colloid-borne americium migration in Gorleben groundwater: significance of iron secondary phase transformation. *Environ. Sci. Technol.* 15, 37(8): 1528-1534.

Stumm, W., Morgan, J.J. (1996): *Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*. John Wiley & Sons; New York.

Weiterführende Literatur:

Lührmann, L., Noseck, U., Tix, C. (1998): Model of contaminant transport in porous media in the presence of colloids applied to actinide migration in column experiments. *Water Res.* 34/3: 421-426.

107 Komplexbildung (3.2.05.01)

107.1 Definition/Kurzbeschreibung

Eine Komplex-Verbindung besteht aus einem Zentralatom und mehreren Liganden. Liganden können Moleküle oder Ionen sein. Durch die Komplexbildung verlieren die Komplexbausteine ihre spezifischen Eigenschaften.

107.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Gelöste Radionuklide liegen in der Regel als positive Kationen vor. Außerdem können anionische Spezies einiger Spalt- und Aktivierungsprodukte (z. B. C-14, Cl-36, I-129, Se-79, Tc-99) auftreten. Die geochemische Stabilität von positiv geladenen Spezies, d. h. ihre Tendenz keine Komplexe mit Bestandteilen der Lösung einzugehen, nimmt mit der Ladung des Zentralatoms ab (Stumm & Morgan 1996). Die Löslichkeit von Radionukliden kann durch Komplexbildung signifikant erhöht werden. Durch die Verminderung der Ladung von komplexierten Kationen verringert sich die Tendenz zur Sorption (z. B. Kienzler et al. 2001).

Bei der Berechnung von Radionuklidkonzentrationen (besonders von Actiniden) in endlagerrelevanten Lösungen anhand der thermodynamischen Löslichkeit bestimmter Festphasen muss die Bildung von Komplexen in der Lösung berücksichtigt werden. Die wichtigsten Komplexe in natürlichen Lösungen sind die Hydrolyse- und Karbonatkomplexe, deren Bildungskonstanten für viele Radionuklide bekannt sind. Schwache Komplexe, wie Chloridkomplexe werden häufig nicht explizit, sondern beispielsweise als Korrekturterm in den Pitzerkoeffizienten berücksichtigt.

107.3 Sachlage am Standort

Hydroxide und Karbonate sind die wichtigsten Lösungskomponenten, mit denen Radionuklide in salinaren Lösungen Komplexe bilden können (Altmaier et al. 2004). Daneben können auch Sulfate und Chloride eine Rolle spielen, auch als gemischte Hydrochloro- und Hydroxosulfatkomplexe.

Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung enthalten in erheblichem Umfang künstliche Komplexbildner, wie z. B. Fluoride, Detergentien, EDTA, NTA und organische Säuren und verschiedene Abbauprodukte von organischen Stoffen. Für diese Art von Abfällen ist die Komplexbildung der wichtigste Prozess, der die Radionuklidmobilisierung beeinflusst. Sofern ein Stofftransport vom Einlagerungsbereich für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in den Einlagerungsbereich für hochradioaktive Abfälle nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, kann auch im Nahbereich der HAW- und BE-Einlagerungsfelder die Radionuklidmobilisierung durch Komplexbildung signifikant beeinflusst werden. Die Entstehung von organischen Komplexbildnern bei der Degradation (z. B. thermochemische Sulfatreduktion) von im Salzgestein vorkommenden Kohlenwasserstoffen ist derzeit in Diskussion.

Im Deckgebirge liegen Komplexbildner in Form von Fulvin- und Huminsäuren vor.

107.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Komplexe stehen mit den Ionen und den ungelösten Phasen im thermodynamischen Gleichgewicht. Abhängig vom geochemischen Milieu kann die Komplexbildung zu einer Erhöhung der Lösungskonzentration führen. Dies gilt besonders für die Actiniden und wird bei der Ermittlung eines Quellterms berücksichtigt.

Die Komplexe mit Hydrolysespezies (z. B. OH(-)) sind in den Lösungen, die in einem Salzstock erwartet werden, von besonderer Bedeutung. Nennenswerte Carbonatkonzentrationen können durch Abbau von organischen Materialien entstehen, die in den Abfällen oder im Einlagerungsbereich vorhanden sind. Die Sulfatkonzentration in den Lösungen ist gering, so dass die Bildung von Sulfat-Komplexen kaum eine Rolle spielt. Die Chloridkomplexe werden entweder explizit oder mit Hilfe der Pitzerkoeffizienten in thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen berücksichtigt.

Die Bedeutung der Komplexe mit schwachen organischen Säuren hängt u. a. von der Menge von Kohlenwasserstoffverbindungen und deren Degradation im Temperaturfeld der hochradioaktiven Abfälle ab.

Sofern ein Stofftransport vom Einlagerungsbereich für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in den Einlagerungsbereich für hochradioaktive Abfälle stattfindet,

kann auch die Radionuklidmobilisierung im Bereich der HAW- und BE-Einlagerungsfelder durch zusätzliche Komplexbildung beeinflusst werden.

107.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

107.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

107.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

107.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

107.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung in den Teilsystemen: Komplexe können in allen Teilsystemen gebildet werden.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Eine Beeinflussung der Initial-Barrieren erfolgt erst über verschiedene andere FEP und wird daher als nicht zutreffend klassifiziert.

107.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Inventar: Organika

Inventar: Sonstige Stoffe

Lösungen im Grubenbau

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Zersetzung von Organika

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Thermochemische Sulfatreduktion

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Begründungen:

Inventar: Organika: Das organische Inventar enthält wichtige Komplexbildner (EDTA usw.).

Zersetzung von Organika: Entstehen von Komplexbildnern durch Degradation von Zellulose (z. B. ISA).

Inventar: Sonstige Stoffe: Diese Abfälle können Komplexbildner enthalten (z. B. Fluorid in Urantails).

Lösungen im Grubenbau: Wichtige Voraussetzung für die Komplexbildung.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Die Bildung von Komplexen wird in ihrem Ausmaß vom geochemischen Milieu beeinflusst, u. a. Konzentrationen der Haupt- und Spurenbestandteile, pH-Wert, Ionenstärke.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Wichtig für Bildung von Komplexen (Konzentration von CO_3 , SO_4 , organische Säuren etc.) bzw. Einfluss auf Stabilität von Komplexen (pH).

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Die Menge an gelösten Radionukliden bestimmt die Möglichkeiten zu deren Beteiligung an Komplexen. Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock Thermochemische Sulfatreduktion.

Bemerkungen:

Kohlenwasserstoffe im Wirtsgestein: Einfluss wird indirekt über Zersetzung von Organika und Geochemisches Milieu beschrieben.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Radionuklidmobilisierung

Sorption und Desorption

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Begründungen:

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Kann durch Komplexbildung (z. B. Veränderung der löslichen Mengen eines Elements) beeinflusst werden.

Auflösung und Ausfällung: Komplexbildung verändert die Löslichkeiten.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Durch Komplexbildung veränderte Löslichkeiten beeinflussen z. B. auch pH und Eh.

Radionuklidmobilisierung: siehe Beschreibung

Sorption und Desorption: Komplexbildung konkurriert mit Sorptionsprozessen um transportfähige Stoffe wie z. B. Radionuklide.

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Durch Komplexbildung kann der Radionuklidtransport verstärkt oder erniedrigt werden.

Bemerkungen:

Inventar: Organika: Da die Radionuklidkonzentrationen im Spurenbereich liegen, ist der Einfluss der Komplexbildung mit Radionukliden auf das Inventar an Organika vernachlässigbar.

107.11 Offene Fragen

- Einfluss von Temperatur auf Komplexbildung unter salinaren Bedingungen
- Inventar an Komplexbildnern in Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und deren Einfluss auf die Radionuklidmobilisierung
- Degradation von Kohlenwasserstoffen zu Komplexbildnern unter standortspezifischen Bedingungen (Salinität, Temperatur, H₂-Druck)

107.12 Literaturquellen

Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, B., Kienzler, B., Marquardt, C., Neck, V., Richter, A. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. - Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlussbericht, FZK-INE 002/04; Karlsruhe.

Kienzler, B., Schüßler, W., Metz, V. (2001) Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen. Institut für Nukleare Entsorgung, Karlsruhe. In: Larue et al.: Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung günstige hydrochemische Bedingungen. Bericht an den BMU-Arbeitskreis zur Auswahl von Endlagerstandorten, AkEnd, GRS-A-2939a.

Stumm, W., Morgan, J.J. (1996) Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters. John Wiley & Sons; New York.

Weiterführende Literatur:

Brasser, T., Droste, J., Müller-Lyda, I., Neles, J.M., Sailer, M., Schmidt, G., Steinhoff, M. (2008) Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, Anhang Parameter, Endlagerspezifische Parameter - Messmethoden und Bedeutung. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-247; Braunschweig.

108 Radionuklidtransport in der flüssigen Phase (3.2.07.01)

108.1 Definition/Kurzbeschreibung

Der Radionuklidtransport in der flüssigen Phase umfasst alle Ausbreitungsarten von Radionukliden in einem flüssigen Transportmedium.

108.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Radionuklide liegen in Lösungen in gelöster Form, als Eigenkolloide oder sorbiert an Kolloiden vor und können durch folgende Prozesse transportiert werden:

- Advektiv mit der Lösung, ausgelöst im Grubengebäude durch die Konvergenz und/oder Gasspeicherung sowie im Deck- und Nebengebirge durch Grundwasserströmungen,
- durch mechanische Dispersion als Begleiterscheinung des advektiven Transportes, z. B. ausgelöst durch Geschwindigkeitsunterschiede in einem porösen Medium,
- durch Diffusion als Folge von Konzentrationsunterschieden in einem Lösungsvolumen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Prozesse erfolgt in den entsprechenden FEP.

Weitere mögliche Transportprozesse, z. B. thermische oder chemische Osmose, sind im FEP Sonstige Transportprozesse beschrieben.

108.3 Sachlage am Standort

Bevor es zu einem Transport von Radionukliden in der flüssigen Phase kommen kann, müssen diese erst mobilisiert werden. Die Mobilisierung der Radionuklide ist von einer Reihe von Einflussgrößen abhängig (siehe FEP Radionuklidmobilisierung). Kommt es zu einer Mobilisierung sind Advektion/Dispersion und Diffusion die wesentlichen Transportmechanismen für Radionuklide in der flüssigen Phase in einem Endlager.

Ob ein advektiv-dispersiver Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen stattfindet, hängt davon ab, ob sich ein durchgängiger Lösungspfad bildet, bevor die Antriebsmechanismen (Konvergenz im Grubengebäude und Gasspeicherung) ab-

geklungen sind. Sind diese Prozesse im Grubengebäude nicht mehr wirksam, ist im Grubengebäude nur noch diffusiver Transport zu betrachten. Bildet sich kein durchgängiger Lösungspfad aus den Einlagerungsbereichen aus, kommt es nicht zu einer Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad.

Diffusive Transportprozesse finden immer statt und spielen bei vielen chemischen Prozessen eine wichtige Rolle. Der diffusive Transport ist in der Regel in Lösungen signifikant langsamer als der advective Transport. Daher wird die Diffusion als Transportprozess für Radionuklide erst relevant, wenn die wesentlichen Antriebsmechanismen für einen advectiven Transport, insbesondere die Konvergenz, zum Erliegen kommen. Obwohl der diffusive Transport in der Regel ein vergleichsweise langsamer Transportprozess ist, muss er im Falle eines durchgängigen Lösungspfades aus den Einlagerungsbereichen auf Grund des langen Nachweiszeitraumes betrachtet werden. Die Geschwindigkeit des Transportes ist ein wichtiger Faktor, da während des Transportes Radionuklide in Abhängigkeit von ihrer Halbwertszeit zerfallen (siehe FEP Radioaktiver Zerfall).

Weitere Transportprozesse (siehe FEP Sonstige Transportprozesse) sind am Standort Gorleben nicht relevant.

Wichtige Prozesse für die Beurteilung des Radionuklidtransportes in der flüssigen Phase sind die Sorption und die Komplexbildung. Für die Sorption von Radionukliden ist es wichtig, ob sich die Radionuklide in der flüssigen Phase als Ionen oder als Moleküle bewegen. An Salzgestein ist Sorption der meisten Radionuklide vernachlässigbar. Da hauptsächlich Salzgrus als Versatz verwendet wird, spielt Sorption in den versetzten Strecken keine Rolle bei der Rückhaltung von Radionukliden. Bedeutend ist die Sorption von Radionukliden an Korrosionsprodukten der Metalle (z. B. Magnetit in NaCl-reichen oder an Eisen(II)-Hydroxiden in Mg-reichen Salzlösungen) im Einlagerungsbereich, den Verschlussmaterialien und deren Korrosionsprodukten sowie an Mineralphasen in Deckgebirgsschichten (siehe FEP Sorption und Desorption).

Durch Komplexbildung werden gelöste Radionuklide in einem Komplex gebunden. Folge ist eine Erhöhung der Gesamtkonzentration an Radionukliden (gelöst und komplexiert) in der flüssigen Phase. Vor allem bei der Beurteilung des Transportes schwerlöslicher Radionuklide ist die Komplexbildung bedeutsam. Dies gilt vor allem für die Actiniden (siehe FEP Komplexbildung).

108.4 Standortspezifische Auswirkungen

Letztlich ist in einer Konsequenzenanalyse zu prüfen, ob ausreichend Lösungsmengen für eine Mobilisierung von Radionukliden in der wässrigen Phase zur Verfügung stehen und ob ein Transport über die flüssige Phase möglich ist. Kommt es zu einer Freisetzung von Radionukliden in der flüssigen Phase aus dem Einlagerungsbereich, muss diese gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept (Mönig et al. 2012) bewertet werden.

108.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

108.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

108.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

108.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

108.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Unter der Voraussetzung, dass eine Mobilisierung von Radionukliden aus der Abfallmatrix stattgefunden hat, ist ein Transport von Radionukliden in der flüssigen Phase wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Nach einer Mobilisierung von Radionukliden ist deren Transport in allen Teilsystemen möglich.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Der Transport von Radionukliden in der flüssigen Phase hat keinen Einfluss auf die durchströmten Medien und damit auch nicht auf vorhandene Barrieren. Die Auswirkungen des mit einem Transport von Radionukliden verbundenen radioaktiven Zerfalls werden im entsprechenden FEP diskutiert.

108.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Radioaktiver Zerfall

Radionuklidmobilisierung

Sorption und Desorption

Kolloide

Komplexbildung

Advektion

Mechanische Dispersion

Diffusion

Matrixdiffusion

Begründungen:

Radionuklidmobilisierung: Nach einer Mobilisierung von Radionukliden erfolgt in der Regel auch deren Transport.

Radioaktiver Zerfall: Der Zerfall eines Radionuklids kann Auswirkungen auf seinen Transport haben. Bei einem Zerfall in ein stabiles Isotop entfällt es bei der Beschreibung des Radionuklidtransportes.

Kolloide: In Lösungen vorhandene kolloidale Partikel können Radionuklide anlagern und somit deren Transport entscheidend beeinflussen.

Advektion: Als relevanter Transportprozess beeinflusst die Advektion den Transport von Radionukliden, vor allem im Deck- und Nebengebirge.

Diffusion: Als relevanter Transportprozess beeinflusst die Diffusion den Transport von Radionukliden in allen Teilsystemen.

Matrixdiffusion: Als Transportprozess beeinflusst die Matrixdiffusion den Transport von Radionukliden. Sie spielt für das Endlagersystem in Gorleben im Vergleich zu Advektion und Diffusion aber eine untergeordnete Rolle.

Mechanische Dispersion: Findet im Zusammenhang mit advektiven Transportprozessen statt und führt zu einer Aufweitung von Schadstoffverteilungen.

Sorption und Desorption: Sorption kann zur Rückhaltung von transportierten Radionukliden führen.

Komplexbildung: Komplexbildung kann das chemische Verhalten von Radionukliden in der flüssigen Phase ändern.

Bemerkungen:

Inventar: Radionuklide: Das Inventar an Radionukliden ist eine Voraussetzung für die Radionuklidmobilisierung. Es wirkt deshalb indirekt auf den Transport von Radionukliden und wird deshalb bei den direkten Abhängigkeiten nicht aufgeführt.

Geochemisches Milieu im Grubenbau, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge: Wirken indirekt über die Einzelprozess wie z. B. Sorption, Komplexbildung etc.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude, Grundwasserströmung in der Geosphäre und die Gasströmung in der Geosphäre wirken indirekt über die Einzeltransportprozesse Advektion etc. und werden deshalb hier nicht aufgeführt.

Oberflächengewässer: Es besteht ein indirekter Einfluss über die Grundwasserströmung in der Geosphäre etc. Das FEP wird daher hier nicht aufgeführt.

Sonstige Transportprozesse sind nicht aufgeführt, da sie als nicht relevant eingestuft werden.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Sorption und Desorption

Kolloide

Komplexbildung

Begründungen:

Die in Lösung befindlichen Radionuklide bestimmen, auf welche Weise die genannten Prozesse ablaufen können (Radionuklidtransport in der flüssigen Phase = Radionuklidinventar in Lösung).

108.11 Offene Fragen

siehe Angaben bei den FEP zu den einzelnen Transportprozessen

108.12 Literaturquellen

Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

Weiterführende Literatur:

Fjeld, R.A., Eisenberg, N.A., Compton, K.L. (2007): Quantitative Environmental Risk Analysis for Human Health. John Wiley & Sons, Inc.; Hoboken, New Jersey.

siehe Angaben bei den FEP zu den einzelnen Transportprozessen

109 Advektion (3.2.07.02)

109.1 Definition/Kurzbeschreibung

Advektion bezeichnet den Transport von gelösten Stoffen mit der Strömung des Transportmediums (Wasser oder Gas).

109.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Als advektiver Transport wird hier allgemein der Transport von Stoffen betrachtet; der Transport des Mediums selbst ist nicht gemeint. Der Transport von Radionukliden wird explizit in den FEP Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und Radionuklidtransport in der Gasphase betrachtet.

Der gelöste Stoff wird bei der Advektion mit der Geschwindigkeit des Transportmediums bewegt, die auf Potentialunterschieden innerhalb des Transportmediums beruht. Eine Schadstoffverteilung bewegt sich bei einem gleichförmigen Geschwindigkeitsfeld der Strömung, ohne Veränderung ihrer räumlichen Ausbreitung. Ein absolut gleichförmiges Geschwindigkeitsfeld ist allerdings ein Idealzustand und tritt in natürlichen Systemen nicht auf (siehe FEP Mechanische Dispersion).

109.3 Sachlage am Standort

Im Grundwasser des Deck- und Nebengebirges ist die Advektion der entscheidende Transportmechanismus.

Innerhalb des Grubengebäudes ist ein advektiver Transport von Gasen und von gelösten Stoffen zu betrachten, z. B. beim Zutritt von Grundwässern über den Schacht und von salzstockinternen Lösungen in die Infrastrukturbereiche. Ob ein advektiv-dispersiver Transport von gelösten Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen stattfindet, hängt davon ab, ob sich ein durchgängiger Lösungspfad bildet, bevor die Antriebsmechanismen (Konvergenz im Grubengebäude und Gasspeicherung) abgeklungen sind. Sind diese Prozesse im Grubengebäude nicht mehr wirksam, ist im Grubengebäude nur noch diffusiver Transport zu betrachten (siehe FEP Diffusion).

109.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch Advektion werden Stoffe im Endlagersystem transportiert. Die Inhaltsstoffe der über den Schacht zutretenden Lösungen haben Einfluss auf das geochemische Milieu und sind bei der Auslegung der Schacht- und Streckenverschlüsse zu berücksichtigen.

109.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

109.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

109.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

109.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

109.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Ein advektiver Transport ist wahrscheinlich, hängt aber von einer Reihe von Voraussetzungen ab. Als Voraussetzungen müssen erfüllt sein: Es ist ein Transportmedium, ein Transportweg und ein Antriebsmechanismus (hydraulischer Gradient) vorhanden.

Wirkung in den Teilsystemen: Ein advektiver Transport von gelösten Stoffen ist in allen Teilsystemen zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Advektion hat einen indirekten Einfluss auf die Initial-Barrieren, da sie die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen dahingehend beeinflusst, dass sie die für die Alterationsprozesse notwendigen Edukte zusammenführen und entstehende Produkte abführen kann.

109.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Strömungsprozesse führen zu einem advektiven Transport gelöster Stoffe.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Strömungsprozesse führen zu einem advektiven Transport gelöster Stoffe.

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Strömungsprozesse führen zu einem advektiven Transport gelöster Stoffe.

Beeinflussende FEP: keine

Bemerkungen:

Folgende FEP wirken alle indirekt über das FEP Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen, Konvergenz, Permeabilität, Kanalisierung im Salzgrusversatz, Kanalisierung in Dichtelementen, Störungen und Klüfte im Wirtsgestein, Fluidvorkommen im Wirtsgestein.

Resultierende FEP:

Mechanische Dispersion

Begründungen:

Mechanische Dispersion: Der advective Transport eines Stoffes im Strömungsfeld des Transportmediums führt in einem porösen Stoff durch inhomogene Geschwindigkeitsverteilungen zur mechanischen Dispersion.

Beeinflusste FEP:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Matrixdiffusion

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Advektion ist ein Transportprozess für Radionuklide.

Radionuklidtransport in der Gasphase: Advektion ist ein Transportprozess für Radionuklide.

Matrixdiffusion: Matrixdiffusion ist ein Transportphänomen, das sich bei bestimmten Permeabilitätsunterschieden aus advectiven und diffusiven Transportmechanismen zusammensetzt.

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Die Advektion hat Einfluss auf die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen da sie die für die Alterationsprozesse notwendigen Edukte zusammenführen und entstehende Produkte abführen kann.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Durch die Advektion kann die Menge der Stoffe im Grubenbau verändert werden, die das geochemische Milieu mitbestimmen.

109.11 Offene Fragen

Keine.

109.12 Literaturquellen

Weiterführende Literatur:

Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. - Dover Publication, Inc; New York.

Kinzelbach, W. (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. - Schriftenreihe gwf Wasser, Abwasser, Band 21, Oldenbourg Verlag; München.

Martin, C., Erbmaier, M. (Hrsg.) (2000): Lexikon der Geowissenschaften. - Spektrum Akademischer Verlag GmbH; Heidelberg.

Müller, T. (Hrsg.) (1999): Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie. - Springer-Verlag; Berlin.

Rausch, R., Schäfer, W., Wagner, C.(2002): Einführung in die Transportmodellierung im Grundwasser. - Gebrüder Bornträger; Stuttgart.

110 Mechanische Dispersion (3.2.07.03)

110.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als mechanische Dispersion wird die Aufweitung von Schadstoffverteilungen, die in einem Fluid gelöst vorliegen, durch ungleichförmige Geschwindigkeitsprofile und unterschiedliche Weglängen in den Hohlräumen eines porösen Mediums bezeichnet.

110.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Dispersion ist in natürlichen porösen Medien in der Regel in Ausbreitungsrichtung (longitudinal) oder senkrecht dazu (transversal) unterschiedlich.

Mechanische Dispersion findet nur im Zusammenhang mit advektiven oder konvektiven Transportprozessen statt:

Während die Strömung des Transportmediums mit einer mittleren Geschwindigkeit durch das poröse Medium dargestellt wird, bewegen sich die gelösten Teilchen tatsächlich auf bestimmten Bahnen durch den Porenraum. Einzelne Teilchen können langsamer, andere schneller als die mittlere Geschwindigkeit transportiert werden.

Da eine genaue mathematische Beschreibung der Fließwege schwer durchzuführen ist, wird die mechanische Dispersion makroskopisch analog der Diffusion beschrieben. Bei der Transformation auf größere Skalen müssen zusätzliche Inhomogenitäten (z. B. die Schichtung des Gesteins, Tonlinsen) berücksichtigt werden. Die Zusammenfassung von Diffusion und mechanischer Dispersion wird auch als hydrodynamische Dispersion bezeichnet (Bear 1972). Bei der Durchführung von numerischen Simulationen ist zusätzlich die numerische Dispersion (Dispersion durch eine grobe Diskretisierung eines Modellsystems) zu berücksichtigen.

110.3 Sachlage am Standort

Die mechanische Dispersion spielt bei advektiven Transportprozessen im Endlagersystem immer eine Rolle.

Innerhalb des Grubengebäudes ist eine mechanische Dispersion dann zu betrachten, wenn advektiver Transport von Stoffen stattfindet. Dies geschieht beim Zutritt von Lösungen in die Infrastrukturbereiche. Ob ein advektiv-dispersiver Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen stattfindet, hängt davon ab, ob sich ein durchgängiger Lösungspfad bildet, bevor die Antriebsmechanismen (Konvergenz im Grubengebäude und Gasspeicherung) abgeklungen sind. Sind diese Prozesse im Grubengebäude nicht mehr wirksam, ist im Grubengebäude nur noch diffusiver Transport zu betrachten (siehe FEP Diffusion). Mechanische Dispersion spielt dann keine Rolle mehr.

Bei der Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge ist mechanische Dispersion zu betrachten.

110.4 Standortspezifische Auswirkungen

Bei allen advektiven Transportprozessen bewirkt die mechanische Dispersion ein Auseinanderziehen der Konzentrationsfront sowohl in Richtung der Strömung als auch senkrecht dazu.

110.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

110.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

110.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

110.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

110.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Mechanische Dispersion als Folge von advektivem Transport von gelösten Stoffen in porösen Medien ist wahrscheinlich.

Wirkung in den Teilsystemen: Da im gesamten Endlagersystem poröse Medien auftreten, ist dieser Prozess in allen Teilsystemen zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die mechanische Dispersion ergibt sich aus advektiven Transportmechanismen. Sie hat über die dort beschriebenen Prozesse hinaus keine Einwirkung auf die Funktion der Initial-Barrieren.

110.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Advektion

Begründungen:

Advektion: Der advektive Transport eines Stoffes im Strömungsfeld des Transportmediums führt in einem porösen Stoff durch inhomogene Geschwindigkeitsverteilungen zur mechanischen Dispersion.

Beeinflussende FEP:

Porosität

Begründungen:

Porosität: Die Porosität beeinflusst direkt die unterschiedlichen Transportwege und damit die Ausprägung der mechanischen Dispersion

Bemerkungen:

Strömungsvorgänge im Deck- und Nebengebirge, Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge, Gasströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Strömungsprozesse im betrachteten Teilsystem beeinflussen die Richtung des advektiven Transportes (indirekt über Advektion, siehe auslösende FEP).

Lösungen im Grubenbau, Kanalisierung im Salzgrusversatz, Kanalisierung in Dichtelementen, Fluidvorkommen im Wirtsgestein: Wirken indirekt über die genannten Strömungsprozesse.

Deck- und Nebengebirge, Wirtsgestein: Wirken indirekt über Porosität.

Klüfte und Störungen im Wirtsgestein, Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen, Störungen und Störungszonen: Die genannten Features stellen auf makroskopischer Ebene Inhomogenitäten dar, die zu unterschiedlichen Fließwegen und damit zu einer Dispersion führen können.

Dieses FEP bezieht sich aber nur auf die mechanische Dispersion auf kleineren Skalen (Porosität).

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Matrixdiffusion

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Matrixdiffusion: Die Matrixdiffusion ist eine Kombination aus advektiven und diffusiven Transportprozessen und wird daher auch durch mechanische Dispersion beeinflusst.

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Mechanische Dispersion ist ein Transportprozess für Radionuklide.

Radionuklidtransport in der Gasphase: Mechanische Dispersion ist ein Transportprozess für Radionuklide.

110.11 Offene Fragen

Keine.

110.12 Literaturquellen

Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. - Dover Publications, Inc.; New York.

Weiterführende Literatur:

Kinzelbach, W. (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. - Schriftenreihe gwf Wasser, Abwasser, Band 21, Oldenbourg Verlag; München.

Martin, C., Erbmaier, M. (Hrsg.) (2000): Lexikon der Geowissenschaften. - Spektrum Akademischer Verlag GmbH; Heidelberg.

Rausch, R., Schäfer, W., Wagner, C. (2002): Einführung in die Transportmodellierung im Grundwasser. - Gebrüder Bornträger; Stuttgart.

111 Diffusion (3.2.07.04)

111.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Diffusion versteht man die Durchmischung verschiedener Stoffe, die durch die thermisch bedingte Eigenbewegung der beteiligten Teilchen (Brownsche Molekularbewegung) zustande kommt (z.B Ionen, Atome, Moleküle). Besteht in einem Gasgemisch oder in einer Lösung für eine Substanz ein Konzentrationsgefälle, so wird dieses durch die Diffusion reduziert, die dabei zu einer statistisch gerichteten Bewegung wird und einen Transportprozess darstellt.

111.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Wesentliches Kennzeichen der Diffusion ist, dass die Teilchenbewegung Konzentrationsunterschiede im System ausgleicht: Die Teilchen wandern (diffundieren) dabei im Mittel (Nettostrom) von Orten höherer Konzentration zu solchen niedrigerer Konzentration bis diese Unterschiede ausgeglichen sind.

Die Zusammenfassung von Diffusion und mechanischer Dispersion (siehe FEP Mechanische Dispersion) wird auch als hydrodynamische Dispersion bezeichnet.

Ein Spezialfall der Diffusion, die Matrixdiffusion, wird im FEP Matrixdiffusion abgehandelt.

111.3 Sachlage am Standort

Diffusionsprozesse können sowohl in der Gas-, wie auch in der Lösungsphase stattfinden. Die Diffusion spielt für verschiedene Prozesse und in unterschiedlichen räumlichen Skalen eine Rolle, z. B.:

- Diffusion von Ionen durch die Gelschicht (Glaskorrosion),
- Diffusion von Wasser durch Korrosionsschichten bei Behälterkorrosion,
- Diffusion stellt Gleichgewichte ein , z. B. Auflösung, Ausfällung,
- Instant Release aus Kernbrennstoff erfolgt z. T. durch Diffusion an Korngrenzen,

- Diffusion gelöster Radionuklide im Porenwasser des Versatzes.

Da in allen Teilsystemen in jedem Fall von Konzentrationsunterschieden gelöster oder gasförmiger Stoffe auszugehen ist, werden in jedem Fall auch diffusive Transportprozesse stattfinden. Allerdings finden die meisten Prozesse auf einer kleinskaligen Ebene statt.

111.4 Standortspezifische Auswirkungen

Die Diffusion spielt bei vielen chemischen Prozessen, vor allem bei elektrochemischen Prozessen wie z. B. der Korrosion von Metallen oder bei der Alteration von Verschlussbauwerken, eine wichtige Rolle, da sie Edukte zuführt und Produkte abführt und somit die Kinetik der Prozesse bestimmt.

Im Falle einer Radionuklidfreisetzung bewirkt die Diffusion in einer Lösung bei einem vorhandenen Konzentrationsgefälle einen zusätzlich zur Advektion/Dispersion stattfindenden Transport im Endlagersystem.

Sind die relevanten Antriebsmechanismen im Grubengebäude für advektiven Transport abgeklungen, ist nur noch ein diffusiver Transport zu betrachten. Dieser ist in der Regel allerdings um Größenordnungen langsamer als der advektive Transport. Ob ein relevanter diffusiver Transport in den versetzten Strecken bei kleinen Porositäten möglich ist, ist noch zu untersuchen.

111.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

111.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

111.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

111.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [X] indirekt, [] nicht zutreffend

111.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Diffusive Transportprozesse über kurze Distanzen laufen in allen natürlichen Systemen ab.

Wirkung in den Teilsystemen: Die Diffusion ist daher in allen Teilsystemen zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Diffusion beeinflusst die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen und hat daher einen indirekten Einfluss auf die entsprechenden Initial-Barrieren.

111.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Porosität

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Begründungen:

Porosität: Der für die Diffusion nutzbare Porenraum hat entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit von Diffusionsprozessen.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Bei der Betrachtung des diffusiven Transportes von Radionukliden spielt deren Speziation eine Rolle.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Strömungsprozesse im betrachteten Teilsystem beeinflussen die Diffusionsprozesse dahingehend, dass sie Konzentrationsunterschiede verändern können.

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: Die für die Diffusion nutzbare Klüftigkeit hat entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeit von Diffusionsprozessen.

Gasströmung im Deck- und Nebengebirge, Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Strömungsprozesse im betrachteten Teilsystem beeinflussen die Diffusionsprozesse dahingehend, dass sie Konzentrationsunterschiede verändern können.

Bemerkungen:

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: Wirkt indirekt über Porosität

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Wirkt indirekt über die Porosität

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Matrixdiffusion

Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Die Diffusion hat Einfluss auf die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, da sie die für die Alterationsprozesse notwendigen Edukte zusammenführen und entstehende Produkte abführen kann.

Metallkorrosion, Korrosion der Brennstoffmatrix, Korrosion von Glas, Korrosion von zementhaltigen Materialien: Diffusion gleicht z. B. Konzentrationsunterschiede aus und beeinflusst damit diese Prozesse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau: Durch die Diffusion kann die Konzentration der Stoffe im Grubenbau verändert werden, die das geochemische Milieu mitbestimmen.

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Diffusion ist ein relevanter Transportprozess für Radionuklide.

Radionuklidtransport in der Gasphase: Diffusion ist ein relevanter Transportprozess für Radionuklide.

Matrixdiffusion: Matrixdiffusion setzt sich aus diffusiven und advektiven Transportprozessen zusammen.

111.11 Offene Fragen

Beschreibung des Diffusionsprozesses in versetzten Strecken bei kleinen Porositäten

111.12 Literaturquellen

Weiterführende Literatur:

Martin, C., Erbmaier, M. (Hrsg.) (2000): Lexikon der Geowissenschaften. - Spektrum Akademischer Verlag GmbH; Heidelberg.

Müller, T. (Hrsg.) (1999): Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie. - Springer-Verlag; Berlin.

Wedler, G. (1982): Lehrbuch der Physikalischen Chemie. Verlag Chemie; Basel.

112 Matrixdiffusion (3.2.07.05)

112.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Matrixdiffusion bezeichnet man den diffusiven Übergang von gelösten Stoffen aus Bereichen, in denen advektiver Transport dominiert, in eine Matrix mit immobilem Porenwasser.

112.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der Effekt der Matrixdiffusion ist insbesondere bei Gesteinen zu betrachten, in denen neben wasserführenden Klüften mit advektiv-dispersiv dominiertem Transport von gelösten Stoffen auch eine angrenzende, gering durchlässige Festgesteinsmatrix existiert (z. B. Neretnieks 1980, Jakob et al. 1990, Heath & Montoto 1996). Diffundieren Radionuklide in die Matrix, so werden sie dort einerseits durch die geringere Transportdauer und andererseits möglicherweise durch Sorption an der Gesteinsmatrix zurückgehalten. Je tiefer die Radionuklide dabei in das Gestein eindringen können, desto größer ist der Effekt der Matrixdiffusion. Ab Eindringtiefen von einigen Zentimetern ist Matrixdiffusion in geklüfteten Festgesteinen ein signifikanter Rückhalteprozess (SKB 2010). Sowohl der Diffusionsprozess als auch die Sorption sind reversible Prozesse (siehe FEP Diffusion und Sorption und Desorption).

112.3 Sachlage am Standort

Auf Grund der geologischen Situation spielt Matrixdiffusion am Standort Gorleben eine untergeordnete Rolle. Bei einer Bildung von Klüften, z. B. im Hutgestein, ist Matrixdiffusion gegebenenfalls zu berücksichtigen. Eine entsprechende Wechselwirkung ist auch zwischen den versetzten Strecken und einer gering durchlässigen Auflockerungszone denkbar, bisher aber nicht untersucht worden.

112.4 Standortspezifische Auswirkungen

Wenn Radionuklide in die Matrix diffundieren, führt dies zu einer Verzögerung des Transportes und zu einer Konzentrationsverringern im strömenden Medium (z. B. Moreno et al. 1997, Lever & Bradbury 1985). Der Effekt kann durch die Sorption der

Radionuklide noch verstärkt werden. Matrixdiffusion kann als Transportprozess auch chemische Reaktionen, z. B. die Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen, dahingehend beeinflussen, dass sie die für die Alterationsprozesse notwendigen Edukte zusammenführen und entstehende Produkte abführt. Auf Grund der geologischen Situation am Standort Gorleben sind sowohl die positiven Auswirkungen der Verzögerung des Transportes als auch die Beeinträchtigung der Verschlussbauwerke als gering einzuschätzen.

112.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

112.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

112.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

112.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

112.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung in den Teilsystemen: Da im gesamten Endlager-System mit Bereichen mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten zu rechnen ist, ist dieser Prozess wahrscheinlich und in allen Teilsystemen zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Die Matrixdiffusion hat keinen Einfluss auf die Initial-Barrieren. Der Einfluss über die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (die für die Alterationsprozesse notwendigen Edukte zusammenführen und entstehende Produkte abführen) wird mit den FEP Advektion und Diffusion beschrieben.

112.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Porosität

Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Auflockerungszone

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Advektion

Mechanische Dispersion

Diffusion

Begründungen:

Porosität: Unterschiedliche Porositäten sind eine wichtige Voraussetzung für den Prozess der Matrixdiffusion.

Störungen und Störungszonen, Klüfte im Wirtsgestein, Auflockerungszonen: Das Vorhandensein von Klüften kann zum Prozess der Matrixdiffusion führen.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude: Die Strömungsprozesse im betrachteten Teilsystem beeinflussen die Ausprägung der Matrixdiffusion.

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge: Die Strömungsprozesse im betrachteten Teilsystem (Hutgestein) beeinflussen die Ausprägung der Matrixdiffusion.

Advektion: Die Matrixdiffusion ist eine Kombination aus advektiven und diffusiven Transportmechanismen.

Diffusion: Die Matrixdiffusion ist eine Kombination aus advektiven und diffusiven Transportmechanismen.

Dispersion: Die Matrixdiffusion ist eine Kombination aus advektiven und diffusiven Transportmechanismen und wird daher auch durch die Dispersion beeinflusst.

Bemerkungen:

Verschlussmaterial: Wirkt indirekt über die Porosität.

Lösungen im Grubenbau: Die vorhandenen Lösungen wirken indirekt über die Strömungsprozesse.

Geochemisches Milieu im Grubenbau und hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge haben auf den Prozess der Matrixdiffusion keinen direkten Einfluss. Bei der Betrachtung dieses Transportprozesses für Radionuklide spielt deren Speziation eine Rolle.

Auflockerungszone: Wirkt indirekt über Porosität bzw. Klüfte.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Radionuklidtransport in der Gasphase

Begründungen:

Radionuklidtransport in der flüssigen Phase: Matrixdiffusion ist ein Transportprozess für Radionuklide.

Radionuklidtransport in der Gasphase: Matrixdiffusion ist ein Transportprozess für Radionuklide.

Bemerkungen:

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: Da Matrixdiffusion eine Kombination aus Diffusion und Advektion ist, wird der Einfluss auf die Alterationsprozesse in diesen FEP beschrieben.

112.11 Offene Fragen

Bedeutung der Auflockerungszone

112.12 Literaturquellen

Heath, M.J., Montoto, M. (1996): Rock matrix diffusion as mechanism for radionuclide retardation: natural radio-element migration in relation to the microfractography and petrophysics of fractured crystalline rock. - Final report, EUR 17121, European Commission; Brüssel.

Jakob, A., Hadermann, J., Rôsel, F.(1990): Radionuclide chain transport with matrix diffusion and non-linear sorption - Nagra Technical Report, NTB 90-13; Baden, Schweiz.

Lever, D.A., Bradbury, M.H. (1985): Rock-matrix diffusion and its implications for radionuclide migration. - Mineralogical Magazine, Vol. 49: 245-254.

Moreno, L., Gylling, B., Neretnieks, I. (1997): Solute transport in fractured media - the important mechanisms for performance assessment. - J. of Contaminant Hydrology 25: 283-298.

Neretnieks, I. (1980): Diffusion in the Rock Matrix: An important Factor in Radionuclide Retardation? - J. Geophys. Res. 85: 4379 - 4397.

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (2010): Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. - SKB TR-10-48; Stockholm, Schweden.

113 Sonstige Transportprozesse (3.2.07.06)

113.1 Definition/Kurzbeschreibung

Neben den beschriebenen Prozessen Advektion, Diffusion, Matrixdiffusion und mechanische Dispersion existieren noch andere Transportprozesse, die einen Transport von Radionukliden ermöglichen oder beeinflussen können. Diese werden in diesem FEP subsumiert.

113.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Beim Transport von Wasser (Transportmedium) und seinen Inhaltsstoffen dominieren Advektion, Diffusion und Dispersion (de Marsily et al. 1987). Daneben existieren aber noch gekoppelte thermodynamische Prozesse, wie z. B.

- thermische Osmose: Einfluss eines Temperaturgradienten auf die Strömung des Transportmediums,
- chemische Osmose: Einfluss eines Konzentrationsgradienten auf die Strömung des Transportmediums,
- Hyperfiltration (auch Druckdiffusion oder Umkehrosmose): Einfluss eines hydraulischen Gradienten auf den Transport der Inhaltsstoffe und
- Thermodiffusion (Soret-Effekt): Einfluss eines Temperaturgradienten auf den Transport der Inhaltsstoffe.

Gegebenenfalls ist auch der Wärmetransport zu beachten. Dann können zusätzlich auch

- thermische Filtration: Einfluss eines hydraulischen Gradienten auf den Wärmetransport und
- der Dufour-Effekt: Einfluss eines Konzentrationsgradienten auf den Wärmetransport als gekoppelte thermodynamische Prozesse auftreten.

Für den Opalinuston in der Schweiz wurde eine Bewertung gekoppelter thermodynamischer Prozesse durchgeführt (Soler 1999). Für Ton hat danach nur die thermische Osmose das Potential, Einfluss auf einen Transport von Radionukliden zu nehmen.

113.3 Sachlage am Standort

Eine konsistente Überprüfung der Relevanz gekoppelter thermodynamischer Transportprozesse für Salz ist noch nicht durchgeführt worden.

113.4 Standortspezifische Auswirkungen

Auf der Grundlage der Bewertung gekoppelter thermodynamischer Prozesse für den Opalinuston (Soler 1999) wird davon ausgegangen, dass solche Prozesse auch in Salz sehr geringe Ausprägungen und für den Transport von Stoffen im Endlagersystem keine Relevanz haben.

113.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

113.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

113.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Nicht zu berücksichtigen

Wirtsgestein: Nicht zu berücksichtigen

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

113.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

113.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Alle in diesem FEP aufgeführten Prozesse tragen zum Transport von gelösten Stoffen bei.

Wirkung in den Teilsystemen: Auf Grund der erwarteten geringen Ausprägung der in diesem FEP aufgeführten Prozesse gegenüber den dominierenden Transportprozessen (Advektion, Diffusion etc.), sind keine Auswirkungen zu betrachten.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Auf Grund der geringen Relevanz der Prozesse sind keine Auswirkungen auf Initial-Barrieren gegeben.

113.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP: keine

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP: keine

113.11 Offene Fragen

Bewertung gekoppelter thermodynamischer Transportprozesse für Salz.

113.12 Literaturquellen

De Marsily, G., Fargue, D., Goblet, P. (1988): How much do we know about coupled transport processes in the geosphere and their relevance to performance assessment? - In: Proceedings of GEOVAL 1987, Symposium in Stockholm, April 7-9, 1987, SKI; Stockholm.

Soler, J.M. (1999): Coupled Transport Phenomena in the Opalinus Clay: Implications for Radionuclide Transport. - PSI Bericht 99-07, Paul-Scherrer-Institut; Villigen, Schweiz.

Weiterführende Literatur:

Carnahan. C.L. (1988): Effects of coupled thermal hydrological and chemical processes on nuclide transport. In: Proceedings of GEOVAL 1987, Symposium in Stockholm, April 7-9, 1987, SKI; Stockholm.

114 Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern (3.2.08.01)

114.1 Definition/Kurzbeschreibung

Im FEP Hebung oder Absinken von Abfallbehältern werden Prozesse zusammengefasst, bei denen sich die Lageposition der Abfallbehälter und der sich darin befindlichen Radionuklide im Vergleich zu ihrer Einlagerungsposition verändert.

114.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Ein Transport der Endlagerbehälter von ihrem ursprünglichen Einlagerungsort weg könnte dann stattfinden, wenn sich durch Gebirgsbewegungen die Anordnung der Einlagerungshohlräume verändert oder die Einlagerungshohlräume deformiert werden. Auslösend für solche Gebirgsbewegungen könnte der Diapirismus sein. Als weiterer Transportmechanismus kommt eine Lageverschiebung der Abfallbehälter aus dem Einlagerungsbereich mit aufsteigenden Gesteinsschmelzen infolge eines Vulkanismus in Frage.

Neben diesen geologischen Prozessen muss überprüft werden, ob aufgrund der Fließfähigkeit des Salzes und der gegenüber dem umgebenden Steinsalz größeren Wichte von Einlagerungsbehältern eine schwerkraftbedingte Absinkbewegung der Einlagerungsbehälter auftreten kann. Für ein eventuelles Absinken eines Abfallbehälters im Steinsalz sind dessen Form und Gewicht sowie die u. a. von der Temperatur und Feuchte abhängige Kriechfähigkeit des Salzes relevant. Im Falle der Einlagerung von Abfällen in Bohrlöchern werden die Verrohrung und die sich in ihr befindlichen Abfallgebinde als eine Einheit betrachtet.

Dawson, Tillerson (1978, cit. in NEA/OECD 1998: PFEP-Nr. W 2.033; NEA/OECD 2000) kommen für die WIPP-Site in den USA zu dem Schluss, dass die Dichteunterschiede zwischen Steinsalz und Abfallgebinde nicht so groß sind, dass dadurch langfristig eine nennenswerte Verlagerung der Abfallgebinde stattfindet.

114.3 Sachlage am Standort

Am Standort Gorleben ist während des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahre kein Vulkanismus zu erwarten, so dass die Abfallbehälter nicht durch aufdringende Lava transportiert werden können.

Die Aufwärtsbewegung der Salzgesteine durch aus den Randsenkenbereichen in den Salzstock nachdrängendes Salz beträgt gemittelt seit Miozän bis rezent jährlich 0,02 mm, im Zentrum des Salzstockes beträgt die Rate 0,07 mm/Jahr (s. FEP Diapirismus). Eine dadurch bedingte Verlagerung von Einlagerungsbereichen ergibt für den gesamten Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahre eine Höherlegung der eingelagerten Gebinde um insgesamt 20 m bis 70 m.

Aufgrund der Duktilität des Wirtsgesteins und der Tatsache, dass es keine Fließgrenze besitzt, muss davon ausgegangen werden, dass die schwereren Behälter bzw. im Falle der Bohrlochlagerung die Verrohrungen mit den in ihr untergebrachten Behältern im relativ leichteren Salzgestein nach unten sinken. Die Größenordnung denkbarer Absinkraten unter Einwirkung von Schwerkraft und Reibkraft des viskosen Salzes kann über das Gesetz von Stokes abgeschätzt werden. Nimmt man z. B. darin vereinfacht die Festkörperabmessung und -dichte ungefähr entsprechend einem Pollux-Behälter mit 1,6 m bzw. ca. $6,5 \text{ Mg/m}^3$ an, ergibt sich überschlägig eine Absinkstrecke von knapp 2 m in 1 Mio. Jahren bei einer Salzviskosität von $1\text{E}+17 \text{ Pa s}$. Diese äquivalente Viskosität entspricht der Kriechfähigkeit gemäß Kriechklasse 5 nach Kriechgesetz BGRa für $22 \text{ }^\circ\text{C}$ als Verhältnis der Spannung zur Deformationsrate bei einer effektiven Spannung von 10 MPa. Da die Kriechfähigkeit des Salzes mit der Temperatur zunimmt und bei sehr kleinen effektiven Spannungen die Ungewissheit über das Ausmaß der Kriechfähigkeit stark ansteigt, muss auch das Auftreten größerer Absinkstrecken in Betracht gezogen werden. Die äquivalenten Viskositäten für geothermisch erhöhte Gebirgstemperaturen, z. B. knapp $40 \text{ }^\circ\text{C}$ im Niveau der Erkundungssohle, sind für weiterführende Berechnungen zu ermitteln. Hinsichtlich der zusätzlichen Temperaturerhöhung durch die Abfälle auf bis zu $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ist zu bedenken, dass diese nur für einige hundert Jahre und damit in einem gemessen am gesamten Nachweiszeitraum nur sehr kurzen Zeitraum wirksam ist.

114.4 Standortspezifische Auswirkungen

Durch eine Höherlegung von eingelagerten Abfällen infolge Diapirismus kann sich die Mächtigkeit der Salzbarriere zwischen den Abfällen im Einlagerungsbereich und dem Salzspiegel um 70 m reduzieren.

Unterhalb des Einlagerungsbereichs stehen ca. 2.000 m Hauptsalz an. Bei einem Absinken verändert sich die Raumlage der Behälter im Hauptsalz, wobei sich die Barrierenmächtigkeit bis zum Salzspiegel erhöht.

Da eine Verlagerung von Abfällen durch Diapirismus oder schwerkraftbedingtes Absinken im Wirtsgestein mit nur sehr kleinen Spannungsgradienten verbunden ist, entstehen dabei keine für ihre Funktionstauglichkeit relevanten mechanischen Beanspruchungen anderer Barrieren.

114.5 Zeitliche Beschränkung

Das FEP ist bezüglich der Höherlegung von eingelagerten Stoffen infolge Diapirismus wegen der geringen Aufstiegsrate kurz- und mittelfristig irrelevant. Allenfalls langfristig könnte die dadurch eintretende Barrierenreduzierung für die Integrität der Barriere Bedeutung erlangen.

Der Prozess des viskosen Absinkens ist möglicherweise relevant in der thermischen Phase, da die möglichen Absinkraten bei erhöhter Temperatur um ein Vielfaches erhöht sein können.

114.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

[X] wahrscheinlich, [] weniger wahrscheinlich, [] nicht zu betrachten

114.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Nicht zu berücksichtigen

Deck- und Nebengebirge: Nicht zu berücksichtigen

114.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

[] direkt, [] indirekt, [X] nicht zutreffend

114.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit: Der Aufstieg von Salinargesteinen und der mit ihnen bewegten Endlagerbehälter wird durch die dafür relevanten Parameter wie z. B. die Salzmächtigkeit in den Randsenkengebieten, die Versenkungstiefe und die Kriechgeschwindigkeiten der fortbewegten Salinargesteine bestimmt und als wahrscheinlich angesehen.

Wirkung in den Teilsystemen: Durch die in diesem FEP zusammengefassten Vorgänge kann sich die Lage von Abfällen im Endlagersystem langfristig verändern. Damit verbunden wäre eine Veränderung der Lage relativ zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Daher muss die Berücksichtigung im Teilsystem Wirtsgestein erfolgen.

Da etwaige Lageänderungen nur innerhalb des Wirtsgesteins auftreten können und davon keine über den Nahbereich um ein sich verlagerndes Gebinde hinausreichenden Wirkungen ausgehen, erübrigt sich eine Berücksichtigung in den Teilsystemen Deck- und Nebengebirge sowie Strecken und Schächte.

Im Teilsystem Nahbereich muss eine Berücksichtigung hinsichtlich des Absinkens erfolgen, sofern langfristige Prozesse eine kleinräumige Veränderung des ein Abfallgebände umgebenden Bereichs verursachen.

Beeinträchtigung Initial-Barrieren: Da durch ein Absinken von Abfällen gleichzeitig deren Abstand zum Salzspiegel vergrößert wird, wird das Einschlussvermögen des Endlagersystems durch ein Absinken verbessert. Eine negative Wirkung auf Initial-Barrieren durch ein Absinken braucht daher nicht berücksichtigt zu werden.

Ein Aufstieg von Abfällen mit dem Salz im Zuge des Diapirismus führt unmittelbar zu einer Reduzierung der wirksamen Barrieremächtigkeit zwischen Abfällen und Salzspiegel und wird durch das FEP Diapirismus entsprechend berücksichtigt.

114.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP:

Diapirismus

Begründungen:

Diapirismus: Aufgrund des Salzaufstiegs verändert sich die Position der Abfallbehälter. Der als weiterer möglicher auslösender Prozess infrage kommende Vulkanismus tritt am Standort nicht auf.

Beeinflussende FEP:

Brennelement-Behälter

Sonstige Endlagerbehälter

Bohrlochverrohrung

Wirtsgestein

Begründungen:

Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Bohrlochverrohrung: Die Dichte und Form der Endlagerbehälter in Strecken- und Bohrlochlagerung beeinflussen ihr schwerkraftbedingtes Absinken.

Wirtsgestein: Die Eigenschaften (z. B. Viskosität) des Wirtsgesteins beeinflussen das Absinkverhalten.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Bohrlochverrohrung

Bemerkungen:

Bei einer Verlagerung von Abfällen können sich zwar an einem betrachteten Punkt im Endlagersystem die Inventare ändern, bezogen auf einen größeren Bereich von einigen zehn Metern ist jedoch keine Inventarveränderung durch die Verlagerung gegeben. Deshalb und weil für die Sicherheit des Endlagers nicht die punktgenaue Lage von Abfällen ausschlaggebend ist, werden die Inventar-FEP hier nicht genannt.

Sofern das geochemische Milieu im Grubenbau von der Verfügbarkeit von Wasser beeinflusst ist und die Wasser liefernden Gebirgsbereiche auf den Nahbereich um den Einlagerungsort beschränkt sind, würde die Verlagerung eines Behälters aus einem Bereich heraus, wo sich kein Wasser befand oder bereits z. B. für Korrosionsprozesse verbraucht wurde, in einen Bereich hinein, in dem weiteres Wasser verfügbar ist, einen Einfluss auf das geochemische Milieu und indirekt auf den Korrosionsprozess haben.

Da alle anderen FEP nicht von der metergenauen Lage der Gebinde im Endlagersystem abhängen, ist die Aufzählung der beeinflussten FEP damit vollständig.

114.11 Offene Fragen

Eingrenzung möglicher Absinkraten unter Zugrundelegung verschiedener Kriechgesetze.

114.12 Literaturquellen

Dawson, Tillerson (1978): Nuclear Waste Canister Thermally Induced Motion. - Cit. In: Nea/Oecd (1998). - Sandia National Laboratories, Sand 78-0566: 22 S.; Albuquerque/New Mexico/USA.

Weiterführende Literatur:

Burchardt, S., Koyi, H., Schmeling, H., Fuchs, L. (2012): Sinking of anhydrite blocks within a Newtonian salt diapir: modelling the influence of block aspect ratio and salt stratification. - *Geophys. J. Int.*, 188, 3: 763-778, 15 Fig.; Oxford.

Chemia, Z., Schmeling, H., Koyi, H. (2009): The effect of the salt viscosity on future evolution of the Gorleben salt diapir, Germany. - *Tectonophysics*, 473, 3-4: 446-456; Amsterdam.

NEA/OECD (1998): Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories. An International Database of Features, Events and Processes. - NEA working group report, Vers. 1.0: 86 S.; Paris.

NEA/OECD (2000): Features, Events and Processes (FEP) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Vers. 1.2. - OECD/NEA Publ., Radioactive Waste Management: 88 S.; Paris.

115 Radionuklidtransport in der Gasphase (3.2.09.01)

115.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses FEP umfasst alle Ausbreitungsarten von Radionukliden in einem gasförmigen Transportmedium.

115.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Gasförmige Radionuklide und radioaktive Aerosole können durch folgende Prozesse in der Gasphase transportiert werden:

- durch Advektion,
- durch Dispersion als Begleiterscheinung des advektiven Transportes,
- durch Diffusion in der Gasphase als Folge von Konzentrationsunterschieden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Prozesse erfolgt in den entsprechenden FEP.

115.3 Sachlage am Standort

Im Ostflügel des Endlagers befinden sich gasförmige Radionuklide in den Brennelement-Behältern, oder sie können dort gebildet werden. Da diese Behälter gasdicht sind, können die Radionuklide nur freigesetzt werden, falls der Behälter ausfällt. Im Westflügel befinden sich gasförmige Radionuklide in den sonstigen Endlagerbehältern, oder sie können in diesen gebildet werden. Diese Behälter sind nicht gasdicht. Eine Freisetzung und somit ein Transport gasförmiger Radionuklide im Nahfeld findet somit in jedem Fall statt. Als wichtigstes Radionuklid in der Gasphase ist C-14 in der Form von Methan oder Kohlendioxid zu nennen. Ob ein Transport gasförmiger Radionuklide aus dem Nahfeld bis in das Deck- und Nebengebirge erfolgt, muss durch Prozessanalysen ermittelt werden. Aerosole spielen keine Rolle, da sie durch den Versatz und die Verschlussbauwerke zurückgehalten werden.

115.4 Standortspezifische Auswirkungen

Radionuklide können über den Gaspfad aus dem Endlager entweichen und in die Biosphäre gelangen. Die daraus möglichen resultierenden Strahlenexpositionen sind zu ermitteln. Wenn es keinen zusammenhängenden Lösungspfad vom Nahbereich bis in das Deck- und Nebengebirge gibt, dann ist die Freisetzung gasförmiger Radionuklide entweder diffusiv oder advektiv mit anderen Gasen die einzige mögliche Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager in das Deck- und Nebengebirge und die Biosphäre.

115.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

115.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht zu betrachten

115.7 Wirkung in den Teilsystemen

Nahfeld: Wird berücksichtigt

Wirtsgestein: Wird berücksichtigt

Strecken und Schächte: Wird berücksichtigt

Deck- und Nebengebirge: Wird berücksichtigt

115.8 Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren

direkt, indirekt, nicht zutreffend

115.9 Begründungen

Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung in den Teilsystemen: Da sich in jedem Fall Radionuklide in der Gasphase befinden und somit eine Mobilisierung nicht notwendig ist, ist ein Transport von Radionukliden in der Gasphase wahrscheinlich und in allen Teilsystemen zu betrachten.

Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren: Der Transport von Radionukliden in der Gasphase hat keinen Einfluss auf die durchströmten Medien und damit auch nicht auf vorhandene Barrieren. Die Auswirkungen des mit einem Transport von Radionukliden verbundenen radioaktiven Zerfalls werden im entsprechenden FEP diskutiert.

115.10 Direkte Abhängigkeiten

Auslösende FEP: keine

Beeinflussende FEP:

Radioaktiver Zerfall

Radionuklidmobilisierung

Sorption und Desorption

Advektion

Mechanische Dispersion

Diffusion

Matrixdiffusion

Begründungen:

Radionuklidmobilisierung: Nach einer Mobilisierung von Radionukliden erfolgt in der Regel auch deren Transport.

Radioaktiver Zerfall: Der Zerfall eines Radionuklids kann Auswirkungen auf den Radionuklidtransport haben. Bei einem Zerfall in ein stabiles Isotop entfällt es bei der Beschreibung des Radionuklidtransportes.

Sorption und Desorption: Sorbierte Radionuklide werden mit dem Sorptionsmittel entweder gar nicht mehr oder mit geänderter Geschwindigkeit transportiert.

Advektion: Als relevanter Transportprozess beeinflusst die Advektion den Transport von Radionukliden, vor allem im Deck- und Nebengebirge.

Diffusion: Als relevanter Transportprozess beeinflusst die Diffusion den Transport von Radionukliden in allen Teilsystemen.

Mechanische Dispersion: Findet im Zusammenhang mit advektiven Transportprozessen statt und führt zu einer Aufweitung von Schadstoffverteilungen.

Matrixdiffusion: Falls Matrixdiffusion stattfindet, kann das zu einer Beeinflussung des Transportes führen.

Bemerkungen:

Behälterausfall: Sind in den Behältern Radionuklide in der Gasphase eingeschlossen, kann nach einem Ausfall ein Transport in der Gasphase erfolgen.

Die "Freisetzung" aus der Gasphase wird definitionsgemäß auch als Radionuklidmobilisierung bezeichnet. Daher wirkt ein Behälterausfall indirekt über die Radionuklidmobilisierung.

Strömungsvorgänge im Grubengebäude Grundwasserströmung in der Geosphäre und die Gasströmung in der Geosphäre wirken indirekt über Einzeltransportprozesse Advektion etc. und werden deshalb hier nicht aufgeführt.

Resultierende FEP: keine

Beeinflusste FEP:

Sorption und Desorption

Begründungen:

Sorption und Desorption: Die Transport-FEP bestimmen die verfügbaren Radionuklide, die Sorptionsprozessen unterliegen können.

115.11 Offene Fragen

- Bestimmung der chemischen Form, in der C-14 vorliegt
- Relevanz von I-129 in der Gasphase
- Relevanz der Sorption für Radionuklide in der Gasphase

115.12 Literaturquellen

Weiterführende Literatur:

Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, Minkley, W., Manthei, G. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. - Abschlussbericht des Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz; Salzgitter.

RSK (Reaktor-Sicherheitskommission) (2005): RSK-Stellungnahme: Gase im Endlager (379. Sitzung). - <http://www.rskonline.de/>.

Rübel, A., Noseck, U., Müller-Lyda, I., Kröhn, K.-P., Storck, R. (2004): Konzeptioneller Umgang mit Gasen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-205; Braunschweig.

Rübel, A., Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz. - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242; Braunschweig.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

**Bundesanstalt für Geowissen-
schaften und Rohstoffe**
Stilleweg 2
30655 Hannover

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine

Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60
04279 Leipzig

**Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Nukleare Entsorgung**
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen