

Radiologische Konsequenzenanalyse

Bericht zum Arbeitspaket 10

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Radiologische Konsequenzenanalyse

Bericht zum Arbeitspaket 10

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Jürgen Larue
Bruno Baltes
Heidmarie Fischer
Gerd Frieling
Ingo Kock
Martin Navarro
Holger Seher

Februar 2013
mit Corrigendum April 2013

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 für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) 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 Kenntnisstands 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

Corrigendum:

Gegenüber der Version vom Februar 2013 wurde folgender Fehler behoben:

Auf Seite 7 wurde in der letzten Zeile die Literaturangabe /BMU 10/ durch die richtige Zitierung /BMU 12/ ersetzt. Im Literaturverzeichnis auf Seite 185 wurde die Literaturangabe /BMU 12/ mitaufgenommen.

Deskriptoren:

Freisetzungsanalyse, Gasphase, Gorleben, Lösungsphase, Quellterm, radiologische Konsequenz, Radionuklidfreisetzung, Radionuklidtransport, Zweiphasenfluss

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Methodische Basis.....	5
2.2	Konzept für die Abbildung von Szenarien in Rechenfälle	12
2.3	Szenarien zur radiologischen Konsequenzenanalyse	18
2.3.1	Referenzszenarien.....	18
2.3.2	Alternativszenarien	19
2.3.3	Szenarien aus der Integritätsanalyse	22
3	Datenbasis zum Aufbau der Rechenmodelle.....	25
3.1	Geologie und Hydrogeologie	25
3.2	Endlagerkonzept.....	25
3.2.1	Einlagerungsvariante AB1	26
3.2.2	Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen.....	28
3.2.3	Infrastrukturbereiche, Streckenverschlüsse, Schachtaufbau und Versatz	34
3.2.4	Temperaturfeldberechnung.....	37
3.3	Prozessverständnis zum Endlagersystem	39
3.3.1	Kompaktion des Versatzes	40
3.3.2	Advektion und Diffusion	42
3.3.3	Kohlenwasserstoffe	49
3.3.4	Gasbildung und Lösungsangebot im Grubengebäude	50
4	Modellaufbau & Parameterermittlung	57
4.1	Verwendete Programmcodes.....	57
4.1.1	Das Programm MARNIE.....	57
4.1.2	Das Programm TOUGH2.....	61

4.1.3	Qualifizierung der angewendeten Codes	63
4.2	Modellaufbau	64
4.2.1	Umsetzung des Grubenbaus auf der Einlagerungssohle	65
4.2.2	Umsetzung der Schächte und der Erkundungssohle	70
4.2.3	Umsetzung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz	73
4.2.4	Zeitliche Abfolge der Einlagerung	76
4.2.5	Modellvorstellung zur Freisetzung des volatilen Anteils der Instant Release Fraction (IRF).....	79
4.3	Modellierung mit dem Programm MARNIE und betrachtete Rechen- fälle.....	84
4.3.1	Spezifische Annahmen und Randbedingungen für die MARNIE- Rechnungen	84
4.3.2	Quellterm der Radionuklidmobilisierung.....	87
4.3.3	Betrachtete Rechenfälle.....	100
4.4	Modellierung mit dem Programm TOUGH2 und die betrachteten Rechenfälle.....	107
4.4.1	Gasentwicklung	107
4.4.2	Radionuklidfreisetzung und -transport.....	108
4.4.3	Betrachtete Rechenfälle.....	113
5	Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse.....	125
5.1	Rechenfälle MARNIE (Einquasentransport).....	125
5.1.1	Ergebnisse der Rechenfälle zum Referenzszenarium.....	126
5.1.2	Ergebnisse der Rechenfälle der Alternativszenarien.....	136
5.1.3	Ergebnisse der What-if-Rechnungen zum Systemverständnis und zur Bewertung der Robustheit der Analysen.....	142
5.2	Rechenfälle TOUGH2 (Zweiquasentransport).....	151
5.2.1	Rechenfälle zum Referenzszenarium	153
5.2.2	Rechenfälle zu den Alternativszenarien	160
5.2.3	What-if-Rechenfälle	164

6	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung und Bewertung der Umsetzung des Nachweiskonzepts.....	165
6.1	Lösungstransport.....	166
6.2	Fluidtransport (Zweiphasenfluss).....	168
6.3	Robustheit der Modellrechenergebnisse (What-if-Betrachtungen) Behandlung unwahrscheinlicher Entwicklungen	172
6.4	Analogiebetrachtungen zu den anderen Einlagerungsvarianten	174
6.4.1	Einlagerungsvariante C: Bohrlochlagerung.....	174
6.4.2	Einlagerungsvariante B2: Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern	176
7	Schlussfolgerungen	177
8	Zusammenfassung des identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs.....	181
	Literaturverzeichnis.....	185
	Abbildungsverzeichnis.....	197
	Tabellenverzeichnis.....	201
A	Anhang	205
A.1	Abmessungen des Grubengebäudes.....	205
A.2	Anhang zu Kap. 4.2.1 – Umsetzung des Grubenbaus	209
A.2.1	Weitere Parameter zum Grubenbau für das Programm MARNIE	209
A.2.2	Detaillierte Eingabeparameter für das Programm TOUGH2.....	213
A.3	Anhang zu Kap. 4.2.2 – Umsetzung der Schächte und der Erkundungssohle	219
A.3.1	Weitere Parameter zum Schacht für das Programm TOUGH2	219
A.4	Anhang zu Kap. 4.2.3 – Umsetzung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz	227

A.5	Anhang zu Kap. 4.3.2 – Quellterm der Radionuklidmobilisierung.....	230
A.6	Anhang zu Kap. 4.4.2 – Radionuklidfreisetzung und -transport.....	240
A.7	Biosphärenmodelle	241
A.7.1	Dosiskonversionsfaktoren zur Bewertung des Lösungstransports	241
A.8	Anhang zu Rechenfällen aus dem Referenz- und den Alternativszenarien (Kap. 5.2.1 und Kap. 5.2.2).....	243
A.9	Forschungs- und Entwicklungsbedarf; Formblätter AP 14.....	249
A.9.1	Formblatt AP 10 – 01	249
A.9.2	Formblatt AP 10 – 02.....	250
A.9.3	Formblatt AP 10 – 03.....	252
A.9.4	Formblatt AP 10 – 04.....	254
A.9.5	Formblatt AP 10 – 05.....	255
A.9.6	Formblatt AP 10 – 06.....	257
A.9.7	Formblatt AP 10 – 07.....	258
A.9.8	Formblatt AP 10 – 08.....	259
A.9.9	Formblatt AP 10 – 09.....	260
A.9.10	Formblatt AP 10 – 10.....	261
A.9.11	Formblatt AP 10 – 11	263
A.9.12	Formblatt AP 10 – 12.....	264
A.9.13	Formblatt AP 10 – 13.....	265

1 Einleitung

Nach den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit /BMU 10/ muss ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle den sicheren Einschluss radioaktiver Stoffe über einen Zeitraum von einer Million Jahre gewährleisten. Für diesen Zeitraum muss durch eine Langzeitsicherheitsanalyse belegt werden, dass keine oder allenfalls geringe definierte Stoffmengen in die Biosphäre gelangen können. Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager dürfen langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen. Zentraler Aspekt ist dabei die Analyse des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG).

Nach dem Sicherheits- und Nachweiskonzept der VSG /MÖN 12/ ist die Bewertung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Radionuklide eines der zentralen Elemente des Nachweiskonzeptes im Vorhaben VSG. Diese Bewertung erfolgt anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Auf diese Weise für die Nachverschlussphase berechnete oder abgeschätzte Risiken oder Strahlenexpositionen stellen keine Prognose einer tatsächlichen radiologischen Belastung von in der Zukunft lebenden Personen dar, sondern sind gemäß /BMU 10/ nur als Indikatoren für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau zu interpretieren.

Die Ziele der Analyse der radiologischen Konsequenzenanalyse im Vorhaben VSG (AP 10-Kurztitel: „Analyse Freisetzungsszenarien“) sind neben der Erlangung eines Systemverständnisses die Ermittlung potenzieller radiologischer Konsequenzen in der Langzeitphase. Diese Konsequenzen werden sowohl für das erwartete Systemverhalten (Referenzszenarium) als auch für die aufgrund von Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems betrachteten weniger wahrscheinlichen Szenarien bewertet. Zusätzlich werden Analysen zu Parameterungewissheiten durchgeführt, um den Einfluss der Datenungewissheiten einschätzen zu können und deren Konsequenzen aufzuzeigen. Weiterhin wird der Einfluss bestehender Ungewissheiten auf die Belastbarkeit der numerischen Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse ermittelt und bezüglich der Robustheit der Aussageergebnisse gewürdigt bzw. der sich daraus ableitender F&E-Bedarf ausgewiesen.

Die radiologische Konsequenzenanalyse basiert auf den in den Arbeitspaketen (AP) der VSG erarbeiteten Grundlagen, ihre Analysenergebnisse fließen in die Bewertung der Ergebnisse der VSG (Synthese, AP 13) ein.

Als Daten- und Modellgrundlagen der Analysen werden einerseits die Beschreibungen des Standorts (u. a. geowissenschaftliche Langzeitprognose /MRU 11/), des Abfallinventars (Mengengerüst der Abfälle /PEI 11b/, /PEI 11a/) und der standortspezifischen Endlagerkonzepte /BOL 12/, /BOL 11/ herangezogen. Weiterhin liefern der FEP-Katalog /WOL 12/ und die Szenarientwicklung /BEU 12/ die inhaltliche Grundlage zu der in der radiologischen Konsequenzenanalyse erfolgenden Ableitung der Rechenfälle. Die Rechnungen bauen auf den Ergebnissen der Integritätsanalysen zur geologischen und zu den geotechnischen Barrieren /KOC 12/, /MÜL 12b/ auf. Darüber hinaus bilden die Arbeiten von zwei VSG-Arbeitsgruppen, der AG Kohlenwasserstoffe /BRA 12/ und der AG Quellterm /KIE 13/, /KIE 12/, eine weitere Grundlage für die Definition der notwendigen Modellrandbedingungen und Modellparameter.

Im Rahmen der in diesem Bericht dargestellten Arbeiten wurde die Einlagerungsvariante B1 und die Kombination AB1 /BOL 12/, /BOL 11/betrachtet. Die Einlagerungsvarianten C und B2 werden (wie bei der Integritätsanalyse) darüber hinaus nicht im Detail für die durchgeführten Modellrechnungen verwendet, sondern verbal-argumentativ im Hinblick möglichen Lösungszutritts zu den Abfällen als Differenzbetrachtung bewertet.

Die methodische Basis der radiologischen Konsequenzenanalyse wird in Kapitel 2 näher erläutert. Außerdem wird das Konzept dargestellt, wie unter Einbeziehung der Ergebnisse der Szenarientwicklung und des FEP-Katalogs Rechenfälle für die radiologische Konsequenzenanalyse abgeleitet werden. Es erfolgt eine Beschreibung der behandelten Szenarien (Referenzszenarium bzw. Alternativszenarien) aus der Szenarientwicklung. Es werden die für die radiologische Konsequenzenanalyse bedeutsamen Implikationen dargestellt, die sich aus den Ergebnissen der Integritätsanalyse bzw. -prüfung zu den Szenarien ergeben.

In Kapitel 3 werden als Datenbasis die Geologie, das Endlagerkonzept und das Prozessverständnis der relevanten Prozesse erläutert. Erläuterungen dazu, in welcher Weise diese Grundlagen bei der Ableitung von Rechenfällen sowie die Umsetzung und Parametrierung der Modelle Verwendung fanden, enthält Kapitel 4.

Im Kapitel 4 erfolgt die Beschreibung der verwendeten Programmcodes MARNIE (Einquasentransport) bzw. TOUGH2 (Zweiquasentransport) und die Darlegung ihres derzeitigen Qualifizierungsstandes. Es werden die verwendeten Parameter, der Modelllaufbau bzw. die spezifischen Annahmen und Randbedingungen, die der Durchführung der radiologischen Konsequenzenanalyse zugrunde lagen, dargestellt. Es erfolgt die Auflistung der Rechenfälle und eine Beschreibung. Das Kapitel beschreibt weiterhin die Modellvorstellungen des für die Gaspfadanalyse notwendigen volatilen Anteils der instantanen Radionuklidfreisetzung (IRF), die im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse der VSG entwickelt bzw. angewendet wurde.

Im Kapitel 5 werden sowohl für den Lösungspfad (MARNIE) als auch für den Gaspfad (TOUGH2) die Konsequenzen auch aus den Parameterungewissheiten analysiert und die Ergebnisse der Rechenfälle (Referenzszenarium bzw. Alternativszenarien) zur Einlagerungsvariante „Streckenlagerung“ dargestellt. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung der Analyseergebnisse der außerhalb von Parameterungewissheiten liegenden Rechnungen zu Extremfällen (unwahrscheinliche Entwicklungen) zur Bewertung der Robustheit des Endlagers bzw. zum Aufzeigen weiterer Optimierungsmöglichkeiten des Endlagerdesigns.

Im Kapitel 6 erfolgen eine zusammenfassende Ergebnisdarstellung, die Bewertung der Umsetzung des Nachweiskonzepts und eine Diskussion zur Robustheit der Modellrechenenergebnisse. Weiterhin werden Analogiebetrachtungen zu den in /BOL 11/ betrachteten Einlagerungsvarianten „Bohrlochlagerung“ und „Transportbehälterlagerung“ dargelegt. Sie erfolgen verbal argumentativ im Hinblick auf einen möglichen Lösungszutritt zu den Abfällen als Differenzbetrachtung.

Zuletzt werden in Kapitel 7 die Schlussfolgerungen benannt sowie in Kapitel 8 der identifizierte Forschungs- und Entwicklungsbedarf ausgewiesen.

Die Durchführung der radiologischen Konsequenzenanalyse erfolgte im Vorhaben durch die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS).

2 Grundlagen

2.1 Methodische Basis

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ wird als Langzeitsicherheitsanalyse die Analyse des Langzeitverhaltens des Endlagers nach Stilllegung bezeichnet: *„Zentraler Aspekt ist die Analyse des Einschlussvermögens des Endlagersystems und seiner Zuverlässigkeit. Sie umfasst z. B. die Entwicklung konzeptioneller Modelle, die Szenarientwicklung, die Konsequenzenanalyse, die Unsicherheitsanalyse sowie den Vergleich der Ergebnisse mit vorgegebenen Sicherheitsprinzipien, Schutzkriterien und sonstigen Nachweisanforderungen.“* In der Konsequenz fordern sie hinsichtlich des Langzeitsicherheitsnachweises eines Endlagers:

- *„Maßgeblich für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen in der Nachverschlussphase ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die radioaktiven Abfälle müssen in diesem Gebirgsbereich so eingeschlossen sein, dass sie dort verbleiben und allenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen können. Zusätzliche Strahlenexpositionen sollen nur in einem begrenzten Gebiet auftreten können, so dass möglichst wenige Personen einer Generation betroffen sein können.“* (Abschnitt 6.1 aus /BMU 10/)
- *„Für die Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr auftreten kann. Dabei sind Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.“* (Abschnitt 6.2 aus /BMU 10/)
- *„Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen in der Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass die durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, verursachte zusätzliche effektive Dosis für die dadurch betroffenen Menschen 0,1 Millisievert pro Jahr nicht überschreitet. Dabei sind ebenfalls Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.“* (Abschnitt 6.3 aus /BMU 10/)

- *„Für unwahrscheinliche Entwicklungen wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt. Soweit diese Entwicklungen aber zu hohen Strahlenexpositionen führen können, ist im Rahmen der Optimierung zu prüfen, ob eine Reduzierung dieser Auswirkungen mit vertretbarem Aufwand möglich ist....“ (Abschnitt 6.4 aus /BMU 10/)*

Es ist für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen nachzuweisen, dass die aufgeführten Schutzkriterien eingehalten sind. Zur Bewertung des Einschlussvermögens bieten die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ ein vereinfachtes Verfahren für die radiologische Langzeitaussage an, bei dem die potenzielle Freisetzung von Radionukliden am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs betrachtet wird. Diese vereinfachte radiologische Langzeitaussage ohne Modellierung einer Ausbreitung von Stoffen im Deck- und Nebengebirge ist zulässig, falls die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe die im Abschnitt 7.2.2 der Sicherheitsanforderungen in /BMU 10/ ausgeführten Dosiskriterien (0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen) einhalten. In der radiologischen Konsequenzenanalyse wird daher zunächst das Ausmaß eventueller Freisetzungen aus dem ewG abgeschätzt und geprüft, ob deren Geringfügigkeit mit vereinfachten Ansätzen nachgewiesen werden kann. Andernfalls ist in geeigneter Weise eine etwaige Strahlenexposition in der Biosphäre zu ermitteln um zu prüfen, inwieweit sie mit den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ vereinbar ist.

Bei der Anwendung der Sicherheitsanforderungen auf den Standort Gorleben wird im Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ die Bewertung des Einschlusses der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) gefordert. Die Bewertung der radiologischen Konsequenzenanalyse erfolgt über ein vereinfachtes Verfahren anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien /MÖN 12/. Dabei wird für die radiologische Langzeitaussage am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die potenzielle Freisetzung von sowohl in Lösung befindlichen als auch für volatile Radionuklide betrachtet.

Für in **Lösung befindliche Radionuklide** verwendet das vereinfachte Verfahren einen Index (Indikator), der das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Verhältnis zu einem Freisetzungswert angibt, der als geringfügig angesehen wird /MÖN 12/. Der Indikator wird **Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI)** genannt:

„Der Indikator RGI wird aus den jährlichen Radionuklidströmen S_i [Bq/a] über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d. h. bei Undurchlässigkeit der geologischen Barriere des ewG lediglich über die geotechnischen Verschlussbauwerke am Rand des ewG, berechnet. Dieser Radionuklidstrom wird auf die jährlich geschöpfte Wassermenge W [m³/a] des Versorgungsbrunnens für das Kollektiv von 10 Erwachsenen verteilt. Mit Hilfe von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i [Sv/a / Bq/m³] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} [Sv/a] ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den Indikator RGI,

$$RGI = \frac{10 \cdot \sum_i S_i \cdot DKF_i}{W \cdot K_{RGI}} \quad (2.1)$$

Bei einem Wert für den $RGI \leq 1$ ist die Freisetzung geringfügig.

Die Berechnung des RGI-Wertes wird im Rahmen des Vorhabens VSG wie folgt durchgeführt:

- Die Wassermenge, in der die Radionuklide verteilt werden, beträgt 5000 m³ pro Jahr für ein Kollektiv von 10 Erwachsenen.¹ Die Wassermenge W pro Person beträgt damit 500 m³ pro Jahr.
- Die nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i werden gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ ermittelt.

¹ Für eine Personengruppe, die den gesamten für ihre Ernährung notwendigen Bedarf selbst decken kann, wurden eine notwendige Gruppengröße von 30 Personen und ein Wasserbedarf von 20.000 m³/a abgeschätzt /GSF 02/. Die zur Berechnung des RGI-Wertes in VSG zugrunde gelegte Wassermenge ergibt sich aus der konservativen Annahme, dass der durchschnittliche Wasserbedarf bei einer Gruppe von 10 Personen, die sich selbst versorgt, pro Person 500 m³/a beträgt.

- *Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} beträgt für wahrscheinliche Szenarien 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr, für weniger wahrscheinliche Szenarien 1 Personen-Millisievert pro Jahr.“*

Das in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ niedergelegte und in /MÖN 12/ beschriebene vereinfachte Nachweisverfahren geht von in Wasser gelösten Radionukliden aus. Es gilt somit für auf dem Lösungsweg freigesetzte Radionuklide oder gasförmig freigesetzte Radionuklide, die entlang ihres Transportweges in der Porenfeuchte gelöst werden.

Zur Bewertung der Langzeitsicherheit für **gasförmig (volatil) freigesetzte Radionuklide** liegen in /BMU 10/ und /MÖN 12/ zum vereinfachten Nachweisverfahren keine Ausführungen vor. Daher wird in der VSG ein zum Lösungstransport adäquates Verfahren für volatil freigesetzte Radionuklide entwickelt. Die nicht löslichen Radionuklide verbleiben im Gasstrom und werden mit diesem transportiert und verlassen ggf. den ewG im gasförmigen Zustand. Für diese Radionuklide wird in der VSG, wie im Falle der löslichen Radionuklide, ein Indikator RGI aus dem jährlichen volatilen Radionuklidstrom F [Bq/a] über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d. h. bei einer nachgewiesenen Integrität der geologischen Barriere des ewG lediglich über die geotechnischen Verschlussbauwerke am Rand des ewG, hergeleitet.

In Ermangelung einer Rechenvorschrift zur Bewertung gasförmig freigesetzter Radionuklide wird für den vereinfachten Nachweis in der VSG ein etabliertes Biosphärenmodell zur Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation volatiler Radionuklide verwendet. Das in dieser Analyse zur Bewertung der radiologischen Konsequenz gewählte Biosphärenmodell umfasst den Einstrom der über den Rand des ewG freigesetzten volatilen Radionuklide in ein Wohnhaus mit einer im Haus lebenden Person.

Es wird angenommen, dass das jeweilige gasförmige Radionuklid über einen punktförmigen Freisetzungsort in den Keller eines Wohnhauses eintritt. Weiterhin wird angenommen, dass die Luft im Haus ständig gleichmäßig durchmischt wird und dass durch kontinuierliche Lüftung mehrmals pro Tag ein kompletter Luftaustausch erfolgt. Daraus ergibt sich eine mittlere Konzentration von Radionukliden in der Atemluft.

Durch Multiplikation mit der mittleren Atemrate eines erwachsenen Menschen, der täglichen Aufenthaltsdauer der exponierten Person und dem Dosiskoeffizienten für Inhalation wird die jährliche Strahlenexposition für ein jeweiliges Radionuklid berechnet:

$$D_i = F_i \frac{t_a I}{V_l \beta} D_f \quad (2.2)$$

Mit:

i = Radionuklid

D_i = nuklidspezifische Personendosis; [Sv/a]

D_f = nuklidspezifischer Dosisfaktor für Inhalation [Sv/Bq]
(Für C-14: $D_f = 6,2 \cdot 10^{-12}$ Sv/Bq, für J-129: $D_f \Rightarrow D_f = 9,6 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq, nach /BFS 01/)

F_i = Freisetzungsrate in ein Wohnhaus; [Bq/a]

V_l = anrechenbares Luftvolumen des Hauses; [m³]

β = Luftwechselanzahl; [1/d]

I = Atemrate; [m³/h]

t_a = Aufenthaltsdauer; [h/d]

Die Wärmeschutzverordnung /WVO 95/ sieht z. B. eine Luftwechselzahl β von 0,8/h vor. In der VSG wird ein anrechenbares Luftvolumen des Wohnhauses V_L von 500 m³, eine Luftwechselzahl β von 5,25/d (= 0,22/h) ausgegangen, es wird ein Sicherheitszuschlag für die Lüftungsgewohnheiten von Privatpersonen und eine Aufenthaltsdauer von t_a von 5840 h/a (16 h/d) angesetzt. Die Atemrate der Person beträgt 0,94 m³/h. Für das Radionuklid C-14 ergibt sich aus Gleichung (2.2) ein Dosiskonversionsfaktor (D_{C14}) von $3,53 \cdot 10^{-14}$ Sv/Bq pro Bq/a, der in den Rechnungen zum Gaspfad verwendet wird. Für jedes gasförmig freigesetzte Radionuklid wird die Einzeldosis bestimmt.

Zur Ermittlung des RGI für den Gaspfad wird die Summe der Einzeldosen über 10 Personen gebildet und auf den Bezugswert bezogen. Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} beträgt für wahrscheinliche Szenarien 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr, für weniger wahrscheinliche Szenarien 1 Personen-Millisievert pro Jahr.

Für die radiologische Langzeitaussage werden die potenziellen Freisetzungen über den Lösungspfad und den Gaspfad additiv behandelt.

$$RGI = \frac{10 \cdot \sum_i D_i}{K_{RGI}} + \frac{10 \cdot \sum_i S_i \cdot DKF_i}{W \cdot K_{RGI}} \quad (2.3)$$

In Fällen mit $RGI = 0$ ist ein vollständiger Einschluss gegeben. Dabei kann es zwar zu einem Lösungskontakt mit den Abfällen kommen, aber es werden weder über den Lösungspfad noch über den Gaspfad Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt. In Fällen eines $RGI < 1$ ist die Freisetzung gering und der sichere Einschluss der Radionuklide ist mit dem vereinfachten Verfahren gezeigt. Bei einem $RGI > 1$ ist die vereinfachte radiologische Langzeitaussage nicht mehr möglich. In diesen Fällen ist zu prüfen, ob die Bewertungskriterien für die als Indikator berechneten effektiven jährlichen Individualdosen gemäß Abschnitt 6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ eingehalten werden. Bei diesen Berechnungen ist dann auch der Transport der Radionuklide durch das Deckgebirge bis in die Biosphäre zu betrachten /MÖN 12/.

Mit Hilfe numerischer Analysen wird die Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen, deren Transport im Grubengebäude bis an den Rand des ewG und die resultierenden radiologischen Konsequenzen ermittelt. Zur Demonstration des erwarteten Systemverhaltens, für die Ableitung von gegebenenfalls zeitabhängigen Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems und zur eventuellen Optimierung des Endlagersystems sind deterministische Rechnungen auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung durchzuführen. Zusätzlich sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können /BMU 10/.

In der nachfolgenden radiologischen Konsequenzenanalyse werden daher auf Basis der Ergebnisse der Szenarienermittlung für die identifizierten wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien Rechenfälle abstrahiert. Die Rechenfälle müssen so gewählt sein, dass sie in ihrer Gesamtheit die Szenarien abdecken. Anhand der Rechenfälle werden mögliche Ausbreitungen von Radionukliden über den Gas- und Lösungspfad analysiert. Weiterhin werden für diese Rechenfälle die Einflüsse von Parameterungewissheiten auf die Konsequenzen im Rahmen von deterministischen Unsicherheitsanalysen untersucht. Darüber hinaus werden auch What-if-Betrachtungen für unwahrscheinliche Entwicklungen mit herangezogen, um die Robustheit des Endla-

gersystems, d. h. die Zuverlässigkeit und Qualität der Analyseergebnisse bzw. die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegen Störungen, zu prüfen. Es wird geprüft, ob sich aus What-if-Betrachtungen Optimierungsmöglichkeiten die Robustheit des Endlagerkonzepts aufzeigen lassen.

Die radiologische Konsequenzenanalyse erfolgt in folgenden Schritten:

- Erstellen eines geologisch-geotechnischen Modells
- Festlegung der Rechenfälle, Festlegung der zu modellierenden FEP
- Umsetzung der geologisch-geotechnischen Modelle in numerische Rechenmodelle
- Ermittlung der Quellterme radioaktiver Stoffe, d. h. des zeitlichen Verhaltens der Radionuklidfreisetzung aus den Abfällen. Hierbei wird u. a. zwischen der praktisch sofortigen Freisetzung von Spaltprodukten (Instant Release Fraction, IRF) und der verzögerten Radionuklidfreisetzung durch die Auflösung der Brennstoff- und Glasmatrix bzw. Hüllrohre unterschieden.
- Modellierung des Transports der Radionuklide in der Lösungs- und Gasphase innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes unter Berücksichtigung von Gasbildung und Konvergenz und weiterer relevanter thermischer, mechanischer und chemischer Prozesse.
- radionuklidspezifische Ermittlung der Aktivitätsflüsse über den Gas- und Lösungspfad über den Rand des ewG, wenn ein durchgehender Transportpfad möglich ist.
- Berechnung des radiologischen Geringfügigkeitsindex (RGI) aus Summe der Aktivitätsflüsse über den Gas- und Lösungspfad über den Rand des ewG zum jeweiligen Zeitpunkt.

Zur Erfüllung der Anforderungen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes erfolgt die Analyse einer potenziellen Freisetzung von Radionukliden über den Gaspfad durch das Zweiphasenprogramm TOUGH2 und die Analyse über den Lösungspfad durch das Einphasenprogramm MARNIE (Beschreibungen s. Kap. 4.1). Dabei ist zu beachten, dass für den Einphasenfluss in MARNIE ein durchgehend lösungserfüllter Transportweg für die Radionuklidtransportanalysen vorhanden sein muss. In umfangreichen Systemanalysen wird daher betrachtet, ob sich durch vorhandene Lösungsmengen,

z. B. Versatzfeuchte in Zusammenhang mit kompaktierendem Salzgrusversatz (Porenraumverminderung), oder durch mögliche Zutritte von Lösungen über die Streckenverschlüsse ins Grubengebäude ein durchgehender Lösungspfad ausgebildet. Wesentliche Voraussetzung für einen daraus resultierenden advektiven oder diffusiven Transport von Radionukliden über den Lösungspfad ist das Vorhandensein von zusammenhängenden Porenräumen und ausreichender Lösung im Salzgrusversatz. Als Antriebsmechanismen für die Radionuklidmigration gelten die sich ausbildenden hydraulischen Gradienten, u. a. aufgrund der im Grubengebäude sich ausbildenden konvergenzbedingten Druckunterschiede, die Dichte- bzw. Konzentrationsunterschiede zwischen verschiedenen Lösungen oder innerhalb einer Lösung. Im Zweiphasenprogramm TOUGH2 werden die Gas- und Lösungstransporte gekoppelt behandelt.

2.2 Konzept für die Abbildung von Szenarien in Rechenfälle

Für die numerischen Analysen der Freisetzung und der radiologischen Konsequenz werden in Kap. 1 die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, die im Rahmen der Szenarienentwicklung /BEU 12/ generiert wurden, in Rechenfälle überführt. In /BEU 12/ wurden die wahrscheinlichen bzw. weniger wahrscheinlichen Szenarien durch die sie charakterisierenden FEP (Features, Events, Processes) bestimmt, die untereinander unterschiedlich starke Abhängigkeiten aufweisen.

Dabei ist zu unterscheiden, ob die auf Basis wahrscheinlicher und weniger wahrscheinlicher FEP definierten Szenarien (Referenz- und Alternativszenarien)

- 1) die Radionuklidmobilisierung bzw. ihren Transport im integren Zustand des Barriersystems direkt betreffen oder
- 2) erst in Integritätsanalysen dahingehend überprüft werden, ob sich die Eigenschaften der geologischen bzw. geotechnischen Barrieren so ändern, dass im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse ein zusätzlicher Rechenfall betrachtet werden muss.

Darüber hinaus gibt es FEP (z. B. das FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses*), die eine direkte Relevanz bzgl. der radiologischen Konsequenzenanalyse besitzen, indem sie zu Änderungen des Systems führen. Diese sind in ihrer radiologischen Konsequenz zu analysieren.

Der erste Schritt der Ableitung von Rechenfällen aus den in /BEU 12/ generierten Szenarien lag darin zu prüfen, wie mit dem verfügbaren Analyseinstrumentarium diese Szenarien bzw. die zu berücksichtigenden FEP in einem Modell erfasst werden können. Für die systematische Überführung der Szenarien in Rechenfälle wurde deshalb ein Schema zur Drehbucheerstellung (Schema Storyboard, s. Abb. 2.1) zur Ableitung von Rechenfällen für die unterschiedlichen Entwicklungen in den Referenz- und Alternativszenarien entwickelt. Diese sogenannten Storyboards beschreiben für die entsprechenden Entwicklungsmöglichkeiten die Abhängigkeiten der FEP untereinander und ihre mathematische Formulierung als Prozesse oder Parameter in den verwendeten Rechenmodellen.

Laut /BEU 12/ soll der sichere Einschluss als die zentrale Sicherheitsfunktion gemäß dem Sicherheitskonzept in den ersten tausender Jahren der Nachverschlussphase vorrangig durch die geologische bzw. die geotechnischen Barrieren sichergestellt werden, die bereits mit Beginn der Nachverschlussphase einen Zutritt von Lösungen von außen zu den Abfällen ver- oder behindern können. Sie werden als Initial-Barrieren bezeichnet. Als Ansatzpunkt für die Ableitung von Szenarien dienen daher die FEP, die einen direkten Einfluss auf die Initial-Barrieren (Brennelementbehälter, Strecken- und Schachtverschlüsse) haben (Initial-FEP der Abb. 2.1). Ausgehend von einer integren geologischen Barriere müssen alle FEP, die Einfluss auf die Entwicklungen des Endlagerbergwerks nehmen, untersucht werden. Weiterhin sind die FEP, die die Mobilisierung und den Radionuklidtransport beeinflussen in die Betrachtung einzubeziehen.

Nach /BEU 12/ sind daher neben den Barrieren, die u. a. einen Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindern sollen, die Entwicklungsmöglichkeiten zu betrachten, die sich daraus ergeben, dass Radionuklide aus den Abfällen freigesetzt werden, ohne dass es zu einem Kontakt der Abfälle mit von „*außen zugetretenen Lösungen*“ gekommen ist (z. B. durch die Feuchte im Salzgrusversatz, mögliche vorhandene Feuchte in Behältern). Somit ist für die Modellbetrachtung in der radiologischen Konsequenzenanalyse z. B. eine Betrachtung von initial abfallnah auftretenden Fluiden (Fluide im Versatz/Abfall) als Teile der FEP *Lösungen im Grubengebäude, Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* und *Thermochemische Sulfatreduktion* notwendig, da diese Fluide im Versatz oder Abfall bzw. natürlichen Steinsalz nicht von außen über die Initial-Barrieren in das Endlagersystem gelangen, sondern das System von innen her ändern können. Diese Fluide im Versatz/Abfall, welche durch Korrosion der Behälter und der Abfallmatrix die Radionuklidmobilisierung und -freisetzung sowie den Radionuklidtransport initiieren kann, werden in ihrer Wechselwirkung mit den anderen FEP in

Abb. 2.1 dargestellt. Sie werden u. a. aufgrund der durch das geotechnische Versatzkonzept eingebrachten Feuchte in das Endlagersystem in allen Rechenfällen betrachtet und können durch Initial-FEP überlagert oder verstärkt werden. Weiterhin sind nach /BEU 12/ die Initial-FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters*, *Metallkorrosion* und *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*, die die Initial-Barriere „Brennelement-Behälter“ (BEB) direkt beeinflussen, zu betrachten.

Die Abb. 2.1 zeigt auf der Basis der Beschreibung des Referenzszenariums zur Einlagerungsvariante „Streckenlagerung“ ein Schema für den Ablauf und die Verbindung der Prozesse. Die Fluide im Versatz/Abfall sind als Parameterrandbedingung des Endlagerkonzeptes (Behälter und Einlagerungsvariante) in jeder Entwicklungsmöglichkeit zu untersuchen, da sie nicht bzw. nicht alle von den zeitlichen Entwicklungen der auslösenden FEP (hier: *Erdbeben*, *glaziale Rinnenbildung* und *Fluidvorkommen im Wirtsgestein*) abhängen.

In Ausschnitten zeigt Abb. 2.1, wie die berücksichtigten FEP als Randbedingung, Parameter oder Prozesse im Programm MARNIE Berücksichtigung finden.

Schema zur Erstellung eines Storyboards in der VSG

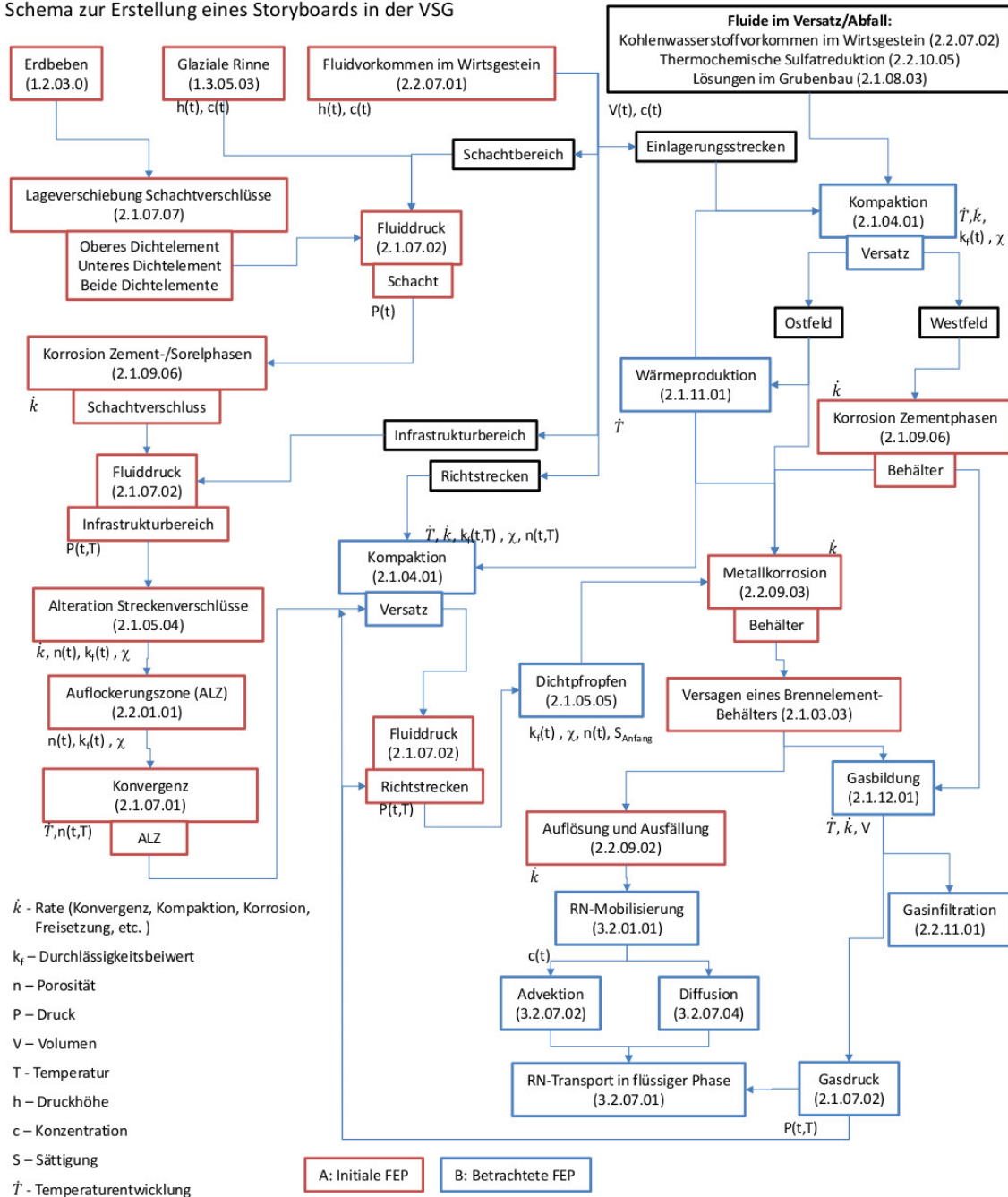


Abb. 2.1 Schema der Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Storyboards

Initial-FEP der Szenarientwicklung (/BEU 12/, rot umrandet) und ihre Wechselwirkung mit weiteren beeinflussenden bzw. zu betrachtenden FEP (FEP-Nummerierung gem. /WOL 12/)

Am Beispiel des in /BEU 12/ beschriebenen Klimabildes, welches auch das auslösende FEP *glaziale Rinnenbildung* enthält, soll kurz der Prozessablauf geschildert werden. Die im Klimabild beschriebene Meeresüberdeckung /BEU 12/ führt zu einem erhöhten Fluiddruck für die obere Schachtabdichtung. Im Rahmen des AP10 wird eine Wassersäule von + 50 m berücksichtigt. Durch die Rinnenbildung wird nach /BEU 12/ das

Deckgebirge nachhaltig stark verändert und kann zu einer Korrosion der Schachtmaterialien führen. Dies kann zu veränderten hydraulischen Durchlässigkeiten der Schachtabdichtung (vgl. Ergebnisse der Integritätsanalyse der geotechnischen Barrieren) führen. Dadurch verändern sich der Zufluss von Lösung über den Schachtverschluss und damit der zeitliche Verlauf des Fluiddrucks im Infrastrukturbereich, der wiederum Einfluss auf die Streckenverschlüsse nehmen kann. Diese eventuell veränderten Verhältnisse werden zu veränderten Parametern (hier: Permeabilität und Porosität) bzw. Randbedingungen für die Streckenverschlüsse führen. Der hieraus evtl. erhöhte Lösungszutritt aus dem Infrastrukturbereich in das Endlager verändert den Fluiddruck in den Strecken und das Kompaktionsverhalten des Salzgrusses, welche als variable Größen in die Rechnung eingehen. Diese Systemveränderungen können sich weiter fortpflanzen und Lösungen über Dichtpfropfen die Abfälle erreichen sowie über die Behälterkorrosion die Gasbildung und evtl. Mobilisierung der Radionuklide bzw. einen Radionuklidtransport in Lösungs- bzw. Gasphase initiieren. Die Nachbildung dieser Prozesse ist programmtechnisch im Code MARNIE berücksichtigt.

Die FEP der Szenarien /BEU 12/ können i. d. R. durch das Storyboard (Abb. 2.1) in ihrer Wechselwirkung dargestellt werden. Damit entstehen für jedes Szenarium bzw. für jeden Rechenfall ein eigener Parametersatz sowie Anfangs- und Randbedingungen.

Tab. 2.1 stellt die Initial-FEP für die Einlagerungsvariante „Streckenlagerung“ AB1 dar. Für einige FEP werden Aussagen über Prozessablauf und ermittelte Parameter aus der Integritätsanalyse nach /KOC 12/, /MÜL 12a/ benötigt. Diese werden in den Modellierungen der radiologischen Konsequenzenanalyse nur dann berücksichtigt, wenn durch das FEP eine Integritätsverletzung festgestellt wurde, die eine Verletzung einer Barriere mit einem durchgängigen Transportpfad für Fluide hervorruft und entsprechende Randbedingungen definiert wurden.

Tab. 2.1 Initial-FEP für die Einlagerungsvariante AB1 (nach /BEU 12/)

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte Initial-Barrieren*
1.2.03.01	<i>Erdbeben</i>	WG, SchV, StrV
1.2.09.01	<i>Diapirismus</i>	WG, SchV, StrV
1.2.09.02	<i>Subrosion</i>	WG, SchV
1.3.04.02	<i>Bildung kryogener Klüfte</i>	WG
1.3.05.03	<i>Glaziale Rinnenbildung</i>	WG, SchV
2.1.03.03	<i>Versagen eines Brennelement-Behälters</i>	BEB
2.1.05.04	<i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i>	SchV, StrV
2.1.07.01	<i>Konvergenz</i>	SchV, StrV
2.1.07.02	<i>Fluiddruck</i>	WG, SchV, StrV
2.1.07.04	<i>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien</i>	WG, SchV, StrV
2.1.07.07	<i>Lageverschiebung des Schachtverschlusses</i>	SchV
2.1.08.08	<i>Quellen des Bentonits</i>	SchV
2.1.09.02	<i>Auflösung und Ausfällung</i>	WG, SchV, StrV
2.1.09.03	<i>Metallkorrosion</i>	BEB
2.1.09.06	<i>Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen</i>	SchV, StrV
2.1.09.07	<i>Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme</i>	BEB
2.2.01.01	<i>Auflockerungszone</i>	SchV, StrV
2.2.02.02	<i>Störungen und Klüfte im Wirtsgestein</i>	WG
2.2.06.01	<i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i>	WG, SchV, StrV, BEB
2.2.07.01	<i>Fluidvorkommen im Wirtsgestein</i>	WG
2.2.07.02	<i>Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein</i>	WG
2.2.10.05	<i>Thermochemische Sulfatreduktion</i>	WG
2.2.11.01	<i>Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein</i>	WG

* WG „Wirtsgestein“, SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“, BEB „Brennelement-Behälter“

2.3 Szenarien zur radiologischen Konsequenzenanalyse

2.3.1 Referenzszenarien

In der VSG werden drei Einlagerungsvarianten untersucht, für die in /BEU 12/ jeweils die abgeleiteten Referenzszenarien dargestellt werden. Nach /BEU 12/ beschreiben die Referenzszenarien eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender, möglicher Entwicklungen des Endlagersystems. Sie ergeben sich unter den in /BEU 12/ festgelegten (spezifischen) Annahmen aus der Berücksichtigung der wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren und den FEP, die die Entwicklung des Endlagersystems beschreiben, sowie solche, die die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden aus den Abfällen bestimmen. Diese FEP der Referenzszenarien sind hinsichtlich ihres Eintretens und ihrer Ausprägung wahrscheinlich, so dass die Referenzszenarien in die Wahrscheinlichkeitsklasse „wahrscheinlich“ eingeordnet werden können. Die Beschreibung der wahrscheinlichen Szenarien basiert auf der Annahme, dass die Integrität der geologischen Barriere des ewG gegeben ist, das heißt, dass sich in ihr keine fluidwirksamen Wegsamkeiten ausbilden. Der notwendige Nachweis, dass diese Annahme tatsächlich gerechtfertigt war, erfolgte im Rahmen der systemanalytischen Bewertungen der Integrität der geologischen /KOC 12/ und geotechnischen Barrieren /MÜL 12a/.

Im Ergebnis der Analysen zu den Einlagerungsvarianten AB1 und AC wurden in /KOC 12/ und /MÜL 12b/ keine Integritätsverletzungen der geologischen Barriere mit einem durchgängigen Transportpfad für Fluide festgestellt. Es wurde gezeigt, dass die geologische Barriere im Bereich des Endlagers (ewG) dauerhaft integer bleibt. Somit ergibt sich für das Referenzszenarium der Einlagerungsvariante AB1, dass nur die in /BEU 12/ beschriebenen FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport durch die geotechnischen Barrieren des Endlagerbergwerks mit wahrscheinlicher Ausprägung zu analysieren sind. Es sind dabei die wahrscheinlichen Entwicklungen, bezogen auf das Verhalten des Verfüll- und Verschlussystems (inkl. Versatz), und der Einfluss auf Lösungszutritt durch die Abdichtungen bzw. die Mobilisierung und den Transport gasförmiger RN zu betrachten. In der radiologischen Konsequenzenanalyse für die Einlagerungsvariante AB1 erfolgt dies für den Einphasentransport mit dem Programm MARNIE und den Zweiphasentransport mit dem Programm TOUGH2 in Kap. 5.1.1 und 5.2.1.

Das Referenzszenarium für die Einlagerungsvariante AB1 ist detailliert in /BEU 12/ beschrieben. Eine vollständige Beschreibung wurde nur für das Referenzszenarium der Einlagerungsvariante AB1 durchgeführt. Für die Referenzszenarien der anderen Varianten erfolgten nur Differenzbetrachtungen /BEU 12/. In der radiologischen Konsequenzenanalyse werden diese Varianten verbal argumentativ im Analogieschluss (s. Kap. 6.4) behandelt.

2.3.2 Alternativszenarien

Nach /BEU 12/ ergeben sich folgende Ausgangspunkte für die Ableitung von Alternativszenarien:

- Entwicklungsmöglichkeiten aus der Betrachtung von Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen,
- Entwicklungsmöglichkeiten aus der Betrachtung von weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP,
- Entwicklungsmöglichkeiten aus der Betrachtung von weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP, die die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport bestimmen, und
- Entwicklungsmöglichkeiten aus der Betrachtung von weniger wahrscheinlichen FEP.

Aus den alternativen Betrachtungen zu den spezifischen Annahmen ergeben sich insgesamt fünf weniger wahrscheinliche Alternativszenarien. Aus der Betrachtung der Alternativszenarien zu den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP führen acht FEP zu zusätzlichen Szenarien, neun FEP werden dagegen durch andere Alternativszenarien und drei durch das Referenzszenarium repräsentiert. Bei den weiteren drei FEP führt die weniger wahrscheinliche Ausprägung zu keinen Alternativszenarien /BEU 12/. Aus der Betrachtung der weniger wahrscheinlichen Ausprägung der Radionuklidmobilisierung sind die Anteile an gasförmigen bzw. leicht zu mobilisierenden Radionukliden (IRF) und die Zersetzung von Organika zu berücksichtigen. Letzteres betrifft die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel und in geringerem Maß eventuell aktivierte Abschirmmaterialien (PE) der POLLUX®- und CASTOR®-Behälter im Ostflügel.

Weitere weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP wie das *Versagen eines Brennelement-Behälters*, *Metallkorrosion* und *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* wurden in /BEU 12/ bereits in den Alternativszenarien zur Beeinträchtigung der Initial-Barrieren integriert. Bei der Ableitung von Rechenfällen in der radiologischen Konsequenzenanalyse müssen daher keine weniger wahrscheinlichen Ausprägungen als eigene Rechenfälle betrachtet werden.

Bei den vier weniger wahrscheinlichen FEP, die eine direkte Beeinträchtigung einer Initial-Barriere aufweisen (s. Tab. 2.2) wird das FEP *Kanalisation in Dichtelementen* bei der Ableitung der Alternativszenarien *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* berücksichtigt. Es ergibt sich nach /BEU 12/, dass hierzu kein weiteres Alternativszenarium zu betrachten ist. Das FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* wird durch bereits vorhandene Alternativszenarien abgedeckt (s. /BEU 12/).

Tab. 2.2 Weniger wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte Initial-Barrieren *
1.5.03.01	<i>Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen</i>	WG
2.1.07.05	<i>Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses</i>	SchV
2.1.07.06	<i>Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses</i>	StrV
2.1.08.05	<i>Kanalisation in Dichtelementen</i>	SchV, StrV

* WG „Wirtsgestein“, SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“

Eine Übersicht der nach /BEU 12/ zu behandelnden Alternativszenarien zeigt Tab. 2.3.

Die beiden FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* führen direkt zu Alternativszenarien und werden in der radiologischen Konsequenzenanalyse behandelt. Die anderen in der Tab. 2.3 aufgeführten Alternativszenarien werden in den Rechnungen als Variationen von Eingangsparametern (s. Kap. 5) behandelt oder nur berücksichtigt, wenn eine Integritätsverletzung (nach AP 9) festgestellt wird, die eine Verletzung einer Barriere mit einem durchgängigen Transportpfad für Fluide hervorruft. Eine entsprechende Bewertung erfolgt im nachfolgenden Kap. 2.3.3.

Tab. 2.3 Übersicht aller Alternativszenarien für die Einlagerungsvarianten AB1 aus /BEU 12/

Szenarium	Basis des Szenariums	
Ansatzpunkt 1: Alternativszenarien aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen	spez. Annahme „Klimaentwicklung“: zwei glaziale Rinnen	A1a1
	spez. Annahme „Klimaentwicklung“: glaziale Rinne, die nicht dem Verlauf der Gorlebener Rinne folgt	A1a2
	spez. Annahme „Sicherheitsabstand“: unterschritten wegen Fehlinterpretation der Erkundungsergebnisse	A1a3
	spez. Annahme „Sicherheitsabstand“: unterschritten wegen unentdeckter Klüfte	A1a4
	spez. Annahme „Erkundungssohle“	A1a5
Ansatzpunkt 2: Alternativszenarien aus Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	Initial-FEP <i>Glaziale Rinnenbildung</i>	A1i1
	Initial-FEP <i>Versagen eines Brennelement-Behälters</i>	A1i2
	Initial-FEP <i>Konvergenz</i>	A1i3
	Initial-FEP <i>Metallkorrosion</i>	A1i4
	Initial-FEP <i>Spannungsänderung und Spannungumlagerung</i>	A1i5
	Initial-FEP <i>Fluidvorkommen im Wirtsgestein</i>	A1i6
	Initial-FEP <i>Thermochemische Sulfat-reduktion</i>	A1i7
	Initial-FEP <i>Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein</i>	A1i8
Ansatzpunkt 3: Alternativszenarien aus FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	FEP <i>Radionuklidmobilisierung</i>	A1m1
Ansatzpunkt 4: Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP	w. w. FEP <i>Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses</i>	A1w1
	w. w. FEP <i>Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses</i>	A1w2

Die Alternativszenarien des Ansatzpunktes 1 werden in den Modellierungen der radiologischen Konsequenz nur berücksichtigt, wenn eine Integritätsverletzung mit einem durchgängigen Transportpfad für Fluide festgestellt und entsprechende Randbedingungen definiert werden (s. folgendes Kap. 2.3.3). Die Alternativszenarien der Ansatz-

punkte 2 und 3 können durch Modellrandbedingungen oder Modellparameter in Berechnungsprogrammen abgebildet werden und, da die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen in /BEU 12/, /WOL 12/ als Werte nicht weiter spezifiziert wurden, im Rahmen der Analyse der Parameterungewissheiten abgehandelt werden. Die Alternativszenarien des Ansatzpunktes 4 werden im Kap. 4.4.3.3 behandelt.

2.3.3 Szenarien aus der Integritätsanalyse

Auch für die weniger wahrscheinlichen Szenarien (in der VSG sind dies alle Alternativszenarien) musste eine Integritätsanalyse durchgeführt werden, da eine Integritätsverletzung mit einer Veränderung der Eigenschaften der geologischen Barriere verbunden sein kann, welche in die radiologische Konsequenzenanalyse mit einbezogen werden müsste. Für die in /BEU 12/ ausgewiesenen Alternativszenarien wurde deshalb in /KOC 12/ eine Integritätsprüfung durchgeführt. In Tab. 2.4 sind die Alternativszenarien dargestellt, die als Rechenfälle oder verbal-argumentativ einer Integritätsprüfung in /KOC 12/ unterzogen wurden.

Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass einige dieser Szenarien zu lokal begrenzten Integritätsverletzungen im Salzstock führen /KOC 12/, jedoch keine Beeinträchtigung der Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere erfolgt. Es bleiben ausreichend große ungestörte Salzpartien erhalten. Wesentlich für die radiologische Konsequenzenanalyse ist, dass die Integritätsprüfung zeigt, dass sich keine weiteren Transportpfade ergeben und sich die Transporteigenschaften der geologischen Barriere insgesamt nicht ändern. Daraus folgt, dass für diese Alternativszenarien somit keine radiologische Konsequenzenanalyse durchgeführt werden muss.

Tab. 2.4 Alternativszenarien zur Integritätsprüfung /BEU 12/

Integritäts-analyse	Betrachtung	Szenarium	Bezeichnung
Rechenfall	Spezifische Annahmen	„Sicherheitsabstand“: unterschritten wegen Fehlinterpretation der Erkundungsergebnisse	A1a3
		„Sicherheitsabstand“ unterschritten wegen unentdeckter Klüfte	A1a4
		„Erkundungssohle“	A1a5
	Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	Initial-FEP <i>Konvergenz</i>	A1i3
		Initial-FEP <i>Metallkorrosion</i>	A1i4
		Initial-FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i>	A1i5
		Initial-FEP <i>Druckgetriebene Infiltration von Fluiden ins Salzgestein</i>	A1i8
Verbalargumentativ	Spezifische Annahmen	„Klimaentwicklung“: zwei glaziale Rinnen	A1a1
		„Klimaentwicklung“: glaziale Rinne, anderer Verlauf	A1a2
	Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	Initial-FEP <i>Glaziale Rinnenbildung</i>	A1i1
		Initial-FEP <i>Subrosion</i>	A1i9

3 Datenbasis zum Aufbau der Rechenmodelle

3.1 Geologie und Hydrogeologie

Die geologischen bzw. hydrogeologischen Grundlagen zur Modellbildung der Berechnungsmodelle bilden die in /BOR 08/, /BRÄ 11/, /KLI 07/, /KÖT 07/ dargelegten allgemeinen Standortbeschreibungen zur Geologie und Hydrogeologie am Standort Gorleben.

3.2 Endlagerkonzept

In /BOL 11/ und /BOL 12/ wurden Endlagerkonzepte zum Standort Gorleben entwickelt und optimiert. Dabei wird grundsätzlich zwischen der Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente in horizontalen Strecken in abschirmenden POLLUX[®]-Behältern (Einlagerungsvariante B1) und der Einlagerung dieser Abfälle in bis zu 300 m tiefen vertikalen Bohrlöchern (Einlagerungsvariante C) unterschieden. Für beide Varianten wird als Option die Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung betrachtet (Einlagerungsvariante A). Für die Variante der Streckenlagerung wurde darüber hinaus im Sinne einer Differenzbetrachtung die Einlagerungsvariante B2 entwickelt, bei der die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle und ausgedienten Brennelemente mittels Transport- und Lagerbehältern (CASTOR[®]-Behälter) endgelagert werden.

Da die Referenzszenarien der verschiedenen Varianten auf dem gleichen Ausgangszustand des Endlagersystems unter Einbeziehung der zugrunde liegenden Einlagerungsvariante unmittelbar nach dem vollständigen Verschluss des Grubengebäudes beruht, ist eine durchgehende Betrachtung der Einlagerungsvariante C und B2 nur dann notwendig, wenn sich hinsichtlich der Entwicklungsmöglichkeit eine Radionuklidmobilisierung und ein daraus resultierender Transport von Radionukliden ergeben kann. Eine Änderung auf Basis der spezifischen Annahmen (s. /BEU 12/) ergibt sich damit nur, wenn ein möglicher Lösungszutritt zu den Abfällen aufgrund der Änderung von spezifischen Annahmen der Einlagerungsvariante zu unterstellen ist. Da dies für das Referenzszenarium aber nicht der Fall ist, erfolgt innerhalb der radiologischen Konsequenzenanalyse eine vollständige Bewertung nur für das Referenzszenarium der Einlagerungsvariante AB1 bzw. der Teilvariante B1. Die Varianten C und B2 werden (wie bei der Integritätsanalyse) darüber hinaus nicht im Detail für die durchgeführten

Modellrechnungen verwendet, sondern verbal argumentativ im Hinblick möglichen Lösungszutritts zu den Abfällen als Differenzbetrachtung in Kap. 6.4 bewertet.

3.2.1 Einlagerungsvariante AB1

In der Einlagerungsvariante „Streckenlagerung“ (Variante B1, Abb. 3.1) wird nach /BOL 12/, /BOL 11/ eine Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle aus ausgedienten Brennelementen im sogenannten Ostflügel in POLLUX[®]-Behältern bzw. CASTOR[®]-Behältern und hochradioaktiver Glasprodukte (HAW-Gläser) ebenfalls in POLLUX[®]-Behältern vorgesehen. Des Weiteren sehen die Planungen vor, im Ostflügel nicht wärmeproduzierende kompaktierte Hülsen und Endstücke von Brennelementen sowohl aus der direkten Endlagerung (Strukturteile) als auch aus der Wiederaufarbeitung (CSD-C Abfälle) und die abgebrannten Brennelemente von Prototypreaktoren (AVR, THTR, KNK II und des Nuklearschiffs NS Otto Hahn), der Forschungs- und der Materialtestreaktoren BER II und FRM II einzulagern. Als zusätzliche Option ist die Einlagerung von sonstigen nicht wärmeentwickelnden Abfällen in Kammern (Variante A, Abb. 3.2) im sogenannten Westflügel vorgesehen /BOL 12/. Teilansichten des Endlagerkonzepts in der Variante AB1 auf der 870 m-Sohle sind in Abb. 3.1 (Ostflügel) und Abb. 3.2 (Westflügel) dargestellt. Eine Gesamtansicht des Endlagers in der Variante AB1 auf der 870 m-Sohle ist in Abb. A.1 des Anhangs enthalten. Das entwickelte Endlagerkonzept /BOL 12/ berücksichtigt die Abfallmengen, die sich nach dem Ausstiegsbeschluss am Ende der Kernenergienutzung für das Jahr 2022 ergeben. Für die VSG wurde die Annahme eines Einlagerungsbeginns am 1. Januar 2035 getroffen. Die Maßangaben für das Endlager in der Einlagerungsvariante AB1 sind in Kap. A.1 des Anhangs zu finden.

Die POLLUX[®]-Behälter und die CASTOR[®]-Behälter mit den Brennelementen der Forschungsreaktoren werden in der Einlagerungsvariante AB1 im Ostflügel liegend mit einem Abstand von 1 m, 2,63 m und 5,5 m (s. Tab. A.7) eingelagert. In einer einzelnen Strecke des Ostflügels werden die Brennelement-Strukturteile in Gussbehältern Typ II liegend mit einem Abstand von 0,1 m eingelagert /BOL 12/.

Im Westflügel (Abb. 3.2) werden die radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Container des Typs IV und VI mit einem Abstand von 0,1 m übereinander gestapelt. Weitere radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung werden dort in Betonbehälter Typ I ebenfalls liegend, aber mit einem Abstand von

0,19 m, bzw. in Gussbehältern Typ II liegend mit einem Abstand von 0,1 m in den Einlagerungskammern endgelagert /BOL 12/.

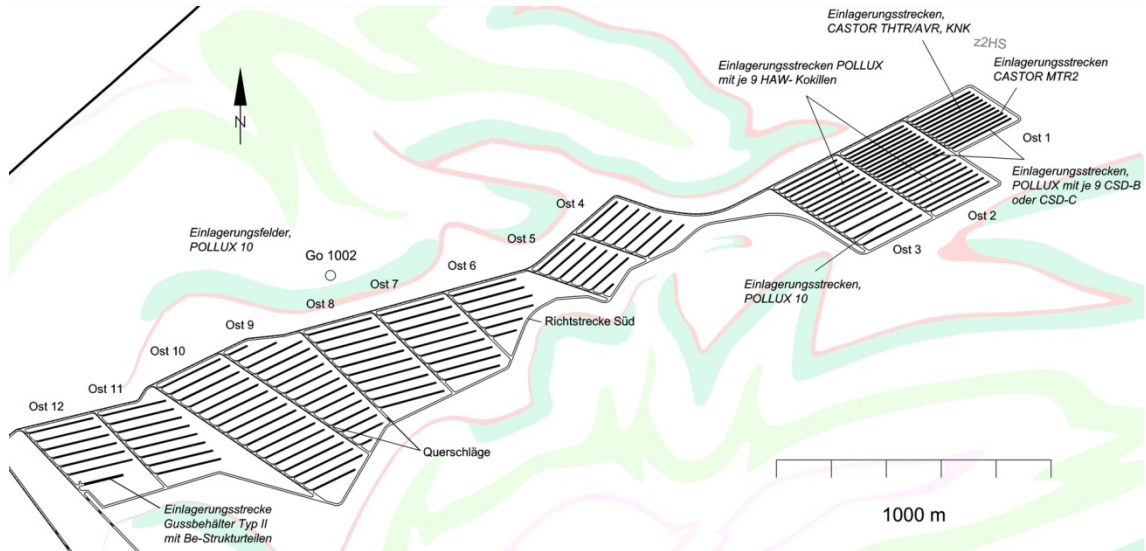


Abb. 3.1 Teilansicht des Ostflügels der Einlagerungsvariante AB1 nach /BOL 12/

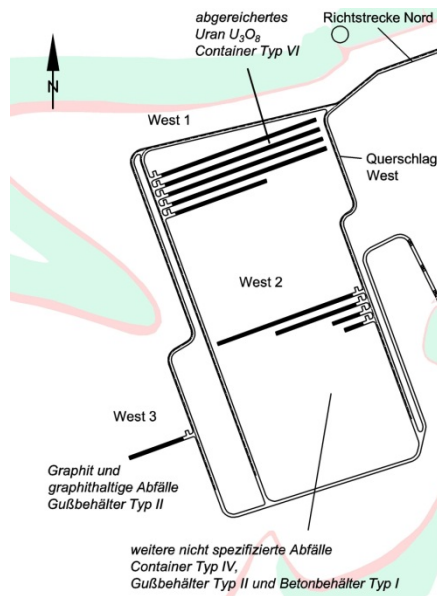


Abb. 3.2 Teilansicht des Westflügels in der Einlagerungsvariante AB1 /BOL 12/

Eine in /BOL 12/ erarbeitete weitere Optimierung der Strecken im Westflügel konnte in den Modellrechnungen nicht mehr berücksichtigt werden.

3.2.2 Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen

Abfallinventar

In /PEI 11a/ wurde das Abfallinventar, das nach dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022 anfällt, zusammengestellt. Dieses Inventar ist Basis des Einlagerungsfahrplans /LER 11b/ für die in /BOL 12/ beschriebene Belegung der Felder mit den Abfällen im Ostflügel der verschiedenen Endlagerkonzepte. Die Mengen, die Element- und Radionuklidinventare sowie die Einlagerungskonzepte wurden aus den Berichten /PEI 11a/, /BOL 11/ und /BOL 12/ der VSG übernommen. Eine nähere Beschreibung der verwendeten Abfallinventare für die radiologische Konsequenzenanalyse mit dem Programmcode MARNIE zur Einlagerungsvariante AB1 kann Kap. 4.3.2 entnommen werden. Das radionuklidspezifische Inventar der einzelnen Abfallarten zu Beginn der Nachverschlussphase ist in Tab. A.15 als Ergebnis einer MARNIE-Rechnung unter Berücksichtigung des Einlagerungszeitplans (s. Anhang A.5) zusammengestellt.

Instant Release Fraktion

Ein Brennelement (BE) besteht aus gebündelten Brennstäben (Anordnung z. B. DWR-BE 16x16, SWR-BE 8x8), dem Fuß- und Kopfstück, den Abstandshaltern und den Führungen für Steuerstäbe. In dem in der VSG für die Einlagerungsvariante Streckenlagerung verfolgten Behälterkonzept ist vorgesehen, vor der Endlagerung der Abfallgebinde, die Fuß- und Kopfstücke sowie die Führungen für die Steuerstäbe zu entfernen und die verbleibenden Brennstäbe in POLLUX[®]-10-Behälter zu verpacken. Die Brennstäbe bestehen aus einem gasdichten Hüllrohr, das die Brennstoffmatrix, bestehend aus Brennstoffpellets (UO₂-Matrix) sowie einen Ringraum mit Gasplenum, einschließt. Die abgetrennten Materialien eines Brennelementes (i. A. Strukturteile genannt) werden gepresst und in einem Gussbehälter Typ II eingelagert.

Die Radionuklide liegen in der Brennstoffmatrix, auf und in den Hüllrohren der Brennstäbe (Aktivierungsprodukte im Cladding) und im Raum zwischen Brennstoffmatrix und Hüllrohr sowohl fest als auch gasförmig vor (s. Abb. 3.3). Radionuklide, die gasförmig oder als leicht lösliche Phasen vorliegen, können als sogenannte „Instant Release Fraction (IRF)“ schnell mobilisiert werden. Dieser Vorgang wird als sofortige bzw. schnelle Freisetzung bezeichnet. Er besteht aus (1) der sofortigen Freisetzung der gasförmigen Radionuklide des Hüllrohres (bei Undichtigkeit) und (2) der bei Anwesenheit

von Lösung der schnellen Auflösung leicht löslicher Sekundärphasen innerhalb von einigen Monaten. Neben den leicht löslichen Sekundärphasen auf den Kornflächen der Brennstoffmatrix befinden sich diese in den Oxidschichten auf der äußeren und inneren Oberfläche der Brennstabhüllrohre /JOH 02/, /JOL 97/, /KIE 12/. Diese Oxidschicht bildet sich während des Reaktorbetriebes z. B. auf der Oberfläche der Hüllrohre in einer Reaktion mit dem Kühlwasser. Diese Oxidschicht reichert z. B. C-14, Cl-36, Ni-59 und Ni-63 aus dem Kühlwasser des Reaktors (s. Abb. 3.4) und durch aus dem Hüllrohr in die Oxidschicht diffundierenden Radionuklide an. Es wird angenommen, dass die Radionuklide aus dieser Oxidschicht auch bei intakten Hüllrohren vergleichsweise rasch in die Gasphase bzw. Lösungsphase freigesetzt werden können /JOH 04/, /JOL 97/, /SMI 93/. Diese Freisetzung ist für das Inventar der POLLUX[®]-10-Behälter, der Behälter mit den Brennelement-Strukturteilen und bei den sonstigen radioaktiven Mischabfällen im Westflügel zu erwarten. Für die CSD-C-Behälter mit verpressten Strukturteilen aus der Wiederaufbereitung ist eine solche Freisetzung nicht zu unterstellen, da hier die Oxidschicht durch die Behandlung mit Säure bei der Wiederaufbereitung entfernt wurde.

Volatile Radionuklide

Im Rahmen der Rechnungen zur VSG wird eine instantane Freisetzung in die Gasphase für die Radionuklide C-14, Se-79 und I-129 als möglich angesehen und daher hinsichtlich der Transportprozesse in der Gasphase untersucht. Ni-59 und Ni-63 liegen in der IRF nicht gasförmig vor und wurden daher nur im Fall der Anwesenheit von Lösung betrachtet.

Weitere Radionuklide sind ohne Bedeutung für eine Freisetzung in den gasförmigen Zustand oder einen Transport in der Gasphase. So ist für die wichtigste gasförmige Chlor-Verbindung (Cl_2) aufgrund der hohen chemischen Reaktivität zu erwarten, dass das durch Radiolyse gebildete Chlorgas einer raschen und praktisch vollständigen Umsetzung zu nichtflüchtigen Verbindungen unterliegt. Chlorverbindungen treten daher nur in Lösung oder im Festkörper auf. Folglich ist ein nennenswerter Radionuklidtransport von Cl-36 in der Gasphase nicht zu erwarten.

Das Element Jod und damit auch das Isotop I-129 kann in elementarer Form als I_2 durch Sublimation direkt vom festen Zustand in den gasförmigen Zustand übergehen und kann deshalb als flüchtig angesehen werden. Ein Transport von Jod in der Gasphase verzögert sich durch Sublimation und Resublimation stark. Alle weiteren einfa-

chen Verbindungen des Jods, z. B. Jodwasserstoff oder Jodsäure, haben eine hohe Löslichkeit bzw. hohe Henry-Koeffizienten auch in salinaren Lösungen, so dass in Anwesenheit von Feuchtigkeit deren Anteile in der Gasphase vernachlässigbar klein sind.

Für Se-79 ist eine Bildung einer gasförmigen Verbindung, wie z. B. SeH₂, nur bei stark reduzierenden Bedingungen denkbar.

Die Freisetzung von C-14 aus der Oxidschicht als CO₂ in die Gasphase beträgt nach /SMI 93/ mit Berufung auf /VKO 85/ bei stationären Verhältnissen 1 % bis 3 % des C-14 Inventars der Brennstabhüllrohre. Dieser Anteil steigt bei den in /SMI 93/ beschriebenen instationären Versuchen mit einer konstanten Gasflussüberströmung (Luft bzw. Argon) auf 10 % des Inventars von C-14 in den Hüllrohren an (s. Tab. 3.1).

Mobilisierung in die Lösungsphase

Zur Mobilisierung der IRF in die Lösungsphase werden in /JOH 02/, /JOL 97/, /KIE 12/ unterschiedliche nuklidspezifische IRF-Werte (s. Tab. 3.1) bei einem ausreichenden Lösungsangebot für die einzelnen hier beschriebenen Vorgänge angegeben, die sich auf unterschiedliche Inventare in den Hüllrohren bzw. der Brennstoffmatrix und den verpressten Strukturteilen beziehen.

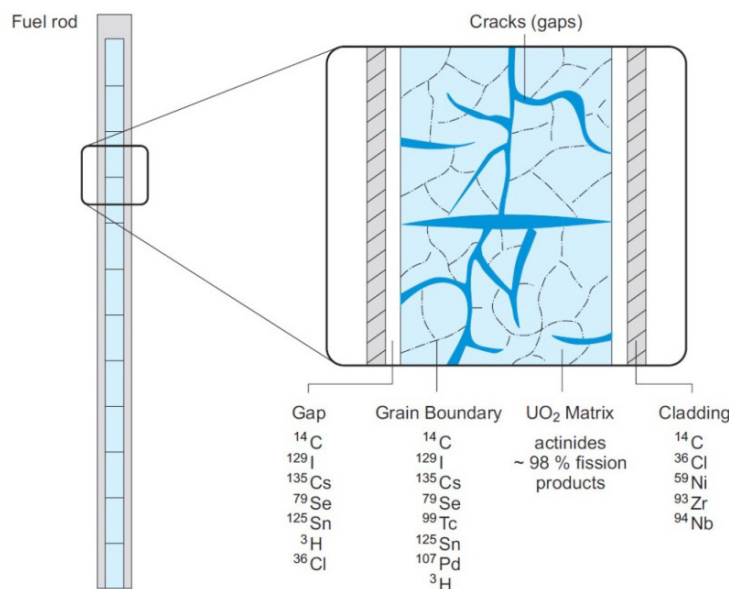


Abb. 3.3 Verteilung einiger Spalt- und Aktivierungsprodukte in einem Brennstab /JOH 02/

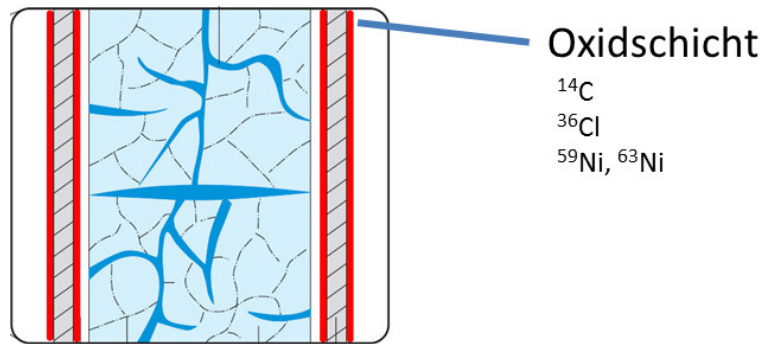


Abb. 3.4 Radionuklide der IRF in der Oxidschicht des Hüllrohres (verändert nach /JOH 02/)

Der Quellterm für radioaktive Isotope in der Lösungsphase wird für den Fall abgeleitet, dass als Ergebnis eines Rechenfalls Lösungen die Abfälle erreichen können. Die möglichen Mobilisierungsmechanismen für Radionuklide aus den unterschiedlichen radioaktiven Abfällen werden in /KIE 13/, /KIE 12/ im Detail beschrieben. Diese gelten unter der Voraussetzung eines ausreichenden Lösungsangebots. In /KIE 13/, /KIE 12/ werden daher vereinfachte Szenarien unterstellt, um für definierte Bedingungen eine Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen in die wässrige Lösung abzuleiten. Dabei wird ein Zutritt von NaCl- oder MgCl_2 -reichen Lösungen zu den Abfallprodukten vorausgesetzt. Unter diesen Randbedingungen laufen zahlreiche geochemische Reaktionen ab, die das geochemische Milieu im Umfeld der Abfälle bestimmen, d. h. die Zusammensetzungen der Lösungen, der Gas- und der Festphasen, der pH-Wert und die Redoxbedingungen. Das resultierende geochemische Milieu hängt vom Verhältnis der reagierenden Komponenten im System, d. h. den Lösungsmengen und reagierenden Mengen an Behälter- bzw. Abfallkomponenten, ab /KIE 13/, /KIE 12/.

Die für die Freisetzung der Radionuklide angenommene Verfügbarkeit von wässrigen Lösungen führt zunächst zu Korrosionsvorgängen an den Behältermaterialien. Die anaerobe Stahlkorrosion bildet unter Verbrauch von Wasser Korrosionsprodukte und Wasserstoff. Die Korrosionsrate hängt hauptsächlich von der Wasserverfügbarkeit, vom pH-Wert der Lösung und den Stahlsorten ab. Ein in den Einlagerungsbereichen vorhandener Restsauerstoff der eingeschlossenen Luft wird innerhalb kurzer Zeit (d. h. weniger Jahre) durch Korrosionsprozesse verbraucht sein.

Bei Anwesenheit hinreichend großer Lösungsmengen können die durch Metallkorrosionsprozesse nicht verbrauchten Lösungen nach einem Ausfall der Behälter mit den Abfällen in Wechselwirkung treten und zur Mobilisierung von Radionukliden führen.

Diese Mobilisierung wird durch einen Radionuklidquellterm beschrieben. Die dafür zugrunde zu legenden geochemischen Randbedingungen wurden für die verschiedenen in der VSG betrachteten Einlagerungsvarianten abgeleitet /KIE 13/, /KIE 12/. Die Radionuklidquellterme gelten für hochradioaktive Glasprodukte (HAW-Gläser), abgebrannte Kernbrennstoffe aus Leistungsreaktoren, kompaktierte Hülsen und Endstücke von Brennelementen (CSD-C Abfälle), abgebrannte Brennelemente der Prototypreaktoren AVR und THTR sowie des KNK II und des Nuklearschiffs NS Otto Hahn, der Forschungs- und der Materialtestreaktoren BER II und FRM II im Ostflügel. Weiterhin werden für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung die Radionuklidquellterme für graphithaltige Abfälle, kompaktierte Strukturmaterialien aus der Pilotkonditionierungsanlage für abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren und Teils aus der Urananreicherung erarbeitet.

Bei der Beschreibung der Radionuklidfreisetzung aus hochradioaktiven Glasprodukten (HAW-Gläser) und abgebrannten Brennelementen aus Leistungsreaktoren konnte auf frühere Studien und die internationale Literatur zurückgegriffen werden. Für die Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren sowie die sonstigen Mischabfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wird in /KIE 13/, /KIE 12/ der verfügbare Kenntnisstand zusammengestellt. Die sonstigen Mischabfälle beinhalten u. a. zementierte Abfälle und in Bitumen bzw. Plastikmaterialien verfestigte Abfälle. Für alle diese Abfallarten wurden charakteristische physikalische und chemische Eigenschaften, Element- und Radionuklidinventare sowie das Freisetzungsverhalten der Radionuklide auf dem gegenwärtigen Kenntnisstand in /KIE 13/, /KIE 12/ beschrieben.

In Kap. 4.3.2 ist die Beschreibung der Radionuklidmobilisierung aus den Abfallprodukten in Rechnungen zur radiologischen Konsequenzenanalyse mit dem Rechenprogramm MARNIE dargestellt.

Mobilisierung in die Gasphase

Neben den bereits beschriebenen Untersuchungen von Spaltgasen in Hüllrohrzwischenräumen bzw. den Untersuchungen von /SMI 93/ zur schnellen Freisetzung von C-14 in Form von CO₂ gibt es nach derzeitigem Wissensstand keine weiteren Erkenntnisse zur direkten Freisetzung von volatilen Radionukliden in die Gasphase. Da die Freisetzungsmechanismen eine direkte Auswirkung auf den Gastransport der Radionuklide haben, besteht hierzu dringender F&E-Bedarf.

In der radiologischen Konsequenzenanalyse der VSG wird, für den Fall dass keine zusätzlichen Lösungen zu den Abfällen herantreten, für die Gasphase derjenige volatile radionuklidspezifische IRF-Anteil angesetzt, der für den Fall eines ausreichenden Lösungsangebots auf Basis des radionuklidspezifischen Inventars der Abfallkomponenten (Hülle, Matrix) angenommen wird. Grund ist, dass keine belastbaren Abschätzungen für den volatilen Anteil einer IRF-Freisetzung mit begrenzten Lösungsangebot in den Gaspfad bekannt sind. In Tab. 3.1 werden die aus der Literatur bekannten IRF-Anteile, die in die Gas- und Lösungsphase freigesetzt werden können, zusammengestellt.

Tab. 3.1 „Instant Release Fraction“ (IRF) - Anteil in %, bezogen auf das Inventar des jeweiligen Radionuklids in der UO₂-Matrix (IRF_{Matrix}), im Hüllrohr (IRF_{Hülle}), in den Strukturteilen (IRF_{Struktur}) und den sonstigen radioaktiven Mischabfälle (IRF_{Sonstige})

Nuklid	IRF _{Matrix} [%] UO ₂ -Matrix /KIE 12/	IRF _{Hülle} [%] Hüllrohr /SMI 93/*	IRF _{Struktur} [%] Strukturteile /JOH 04/	IRF _{Sonstige} [%] Sonstige radioaktive Mischabfälle /BRA 05/
¹⁴ C	10	10	20	2
³⁶ Cl	10	10	20	
⁵⁹ Ni, ⁶³ Ni		10	20	
⁷⁹ Se				10
⁹⁰ Sr	1			
⁹⁹ Tc, ¹⁰⁷ Pd	0,1			
¹²⁹ I	2			10
¹³⁵ Cs, ¹³⁷ Cs	2			

* IRF von C-14 aus der Oxidschicht als CO₂ in der Gasphase, rot kursiv: Annahme für die VSG, da keine Literaturdaten eruiert werden konnten.

Das Kap. 4.2.5 beschreibt die Modellvorstellung des für die Gaspfadanalyse notwendigen volatilen Anteils der instantanen Radionuklidfreisetzung (IRF), die im Rahmen der VSG für die radiologische Konsequenzenanalyse entwickelt bzw. angewendet wurde.

3.2.3 **Infrastrukturbereiche, Streckenverschlüsse, Schachtaufbau und Ver-** **satz**

Im Grubengebäude sind auf der Erkundungs- und der Einlagerungssohle zwei Infrastrukturbereiche vorhanden, die mit Serpentin- oder Basaltschotter verfüllt werden /BOL 11/. Die Infrastrukturbereiche erstrecken sich jeweils von den Schachtansatzpunkten bis zu den Streckenverschlüssen in den Richtstrecken. Auf der in Abb. A.1 dargestellten 870 m-Einlagerungssohle hat der Infrastrukturbereich ein Volumen von 230.000 m³. Der nicht dargestellte Infrastrukturbereich auf der 840 m-Erkundungssohle hat mit 110.000 m³ ein kleineres Volumen. Sie bilden für die eventuell über den Schacht zutretenden Lösungen zusätzliche Speichervolumina, die in Kombination mit dem Schachtverschluss die Ausbildung eines nennenswerten hydraulischen Druckes auf die Streckenverschlüsse langfristig behindern. Zusätzlich zum Serpentin- oder Basaltschotter wird der Infrastrukturbereich mit 19.000 t technischem Bischofit zur chemischen Pufferung langfristig zutretender Laugen verfüllt /MÜL 12b/.

Die komplexen, aus verschiedenen Dicht- und Speicherelementen aufgebauten Schachtverschlüsse (Abb. 3.5 und Tab. 3.2) sind im Verschlusskonzept der VSG vorgesehen, um den Lösungszutritt aus dem Deck- und Nebengebirge so weit zu begrenzen, dass nur geringe Mengen an Lösungen in das Grubengebäude eindringen können. Die Funktionselemente des Schachtverschlusses, deren Material- und Geometrieigenschaften in /MÜL 12a/ dargestellt werden, sind gegen die zu erwartenden Fluiddrücke (hydrostatischer Druck der Wassersäule im Deck- und Nebengebirge) ausgelegt. Bei der Auslegung der Schachtverschlüsse wird eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt, in der ihre Funktion gewährleistet wird /MÜL 12b/. Die zu gewährleistende integrale Permeabilität, die der Auslegung zugrunde lag, wurde in der Vorbemessung mit $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ angesetzt; nach Auslegung der Einzelelemente ergibt sich für das Bauwerk eine um Größenordnungen geringere integrale Permeabilität.

Die Streckenverschlüsse werden aus Gründen der Langzeitstabilität analog zum 3. Dichtelement des Schachtverschlusses ebenfalls aus Sorelbeton A1 mit einer zu gewährleistenden maximalen integralen Permeabilität von $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ hergestellt. Die Konstruktion der Streckenverschlüsse lehnt sich an die bereits umgesetzte Konstruktion der Strömungsbarrieren (Abdichtbauwerke) in der Schachanlage Asse II an /MÜL 12b/. Die Streckenverschlüsse bestehen aus drei Widerlagern am Anfang, in der Mitte und am Ende des Streckenverschlusses. Zwischen den Widerlagern werden Dammbauwerke mit einer Länge von 50 m errichtet. Die Länge der Widerlager beträgt

13,6 m in den Querschlägen West und Ost sowie 15,2 m im Querschlag Mitte und im Streckenverschluss zwischen West- und Ostflügel in der Richtstrecke Nord. Die Gesamtlänge der Streckenverschlüsse beträgt im Querschlag Ost und West 140,8 m und im Querschlag Mitte sowie der Richtstrecke Nord 145,6 m. Der Streckenverschluss in der Richtstrecke Nord ist 18 m von der Kreuzung zwischen dem Querschlag Mitte und der Richtstrecke Nord entfernt /MÜL 12b/.

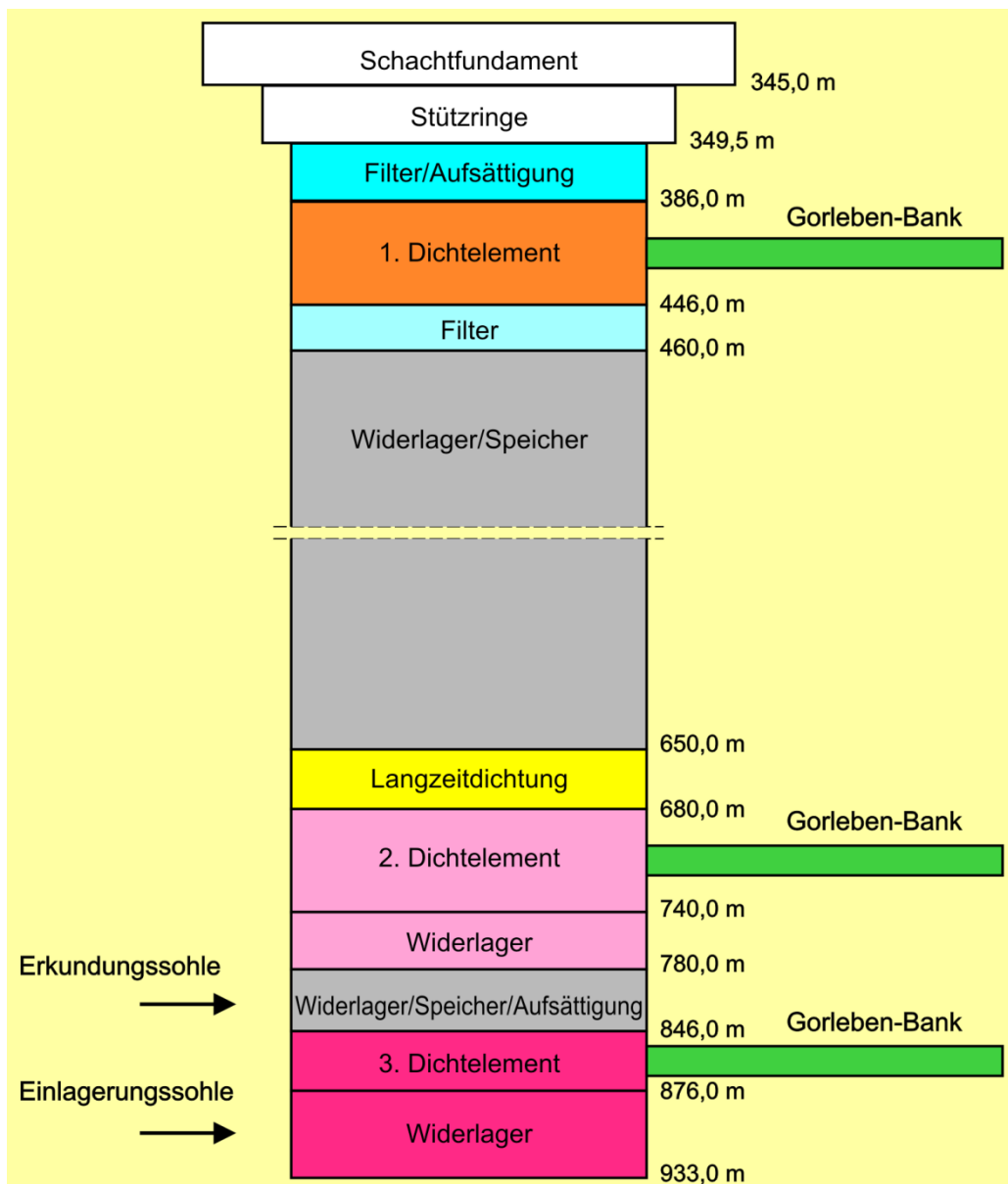


Abb. 3.5 Funktionselemente des Schachtverschlusses Gorleben (aus /MÜL 12b/)

Tab. 3.2 Auslegungsgrößen der Funktionselemente nach /MÜL 12b/

Funktionselement	Material	Permeabilität [m²]	Porosität [%]
Filter/Aufsättigung	Basaltsplitt, ggf. Kies, Sand	$10^{-10} - 10^{-12}$	25 – 35
1. Dichtelement	Bentonit	integral: $1 \cdot 10^{-17}$	27 – 34
Filter	Splitt, Kies, Sand	$10^{-10} - 10^{-12}$	25 – 35
Widerlager 1 dräniert	Salzbeton	wie Schotter $10^{-10} - 10^{-12}$	10
Speicher (Schotter 1)	Basaltschotter	$10^{-7} - 10^{-9}$	23 oder 38
Langzeitdichtung	Feuchter Salzgrus	$10^{-13} - 10^{-15^*}$	10 [*] (durch Kompaktion Reduktion)
Widerlager 2	Salzbeton	Salzbeton $2 \cdot 10^{-15}$	10
2. Dichtelement	Salzbeton	integral: $7 \cdot 10^{-19}$	10
Widerlager 3	Salzbeton	integral: $7 \cdot 10^{-19}$	10
Speicher (Schotter 2)	Basalt-/ Serpentinitschotter	$10^{-7} - 10^{-9}$	38
3. Dichtelement	Sorelbeton	integral: $5 \cdot 10^{-17}$,	16 – 24 [*] (durch Quellen Reduktion)
Widerlager 4	Sorelbeton	Sorelbeton $5 \cdot 10^{-17}$	16 – 24 [*] (durch Quellen Reduktion)

* Anfangspermeabilität bzw. -porosität, weitere Informationen zu den Auslegungsgrößen in /MÜL 12a/

Die für die Modellrechnungen in MARNIE und TOUGH2 verwendeten Parameterwerte zur Permeabilität und Porosität der Schachtfunktionselemente finden sich in Tab. 4.2 (Kap. 4.2.2).

Die Endlagerkonzepte, die im Rahmen der VSG entwickelt wurden, sehen für den größten Teil der Grubenbaue (Einlagerungsstrecken, Querschläge und Richtstrecken) Salzgrusversatz und für die Infrastrukturbereiche eine Verfüllung mit Serpentin- oder Basaltschotter als technische Verschlussmaßnahme vor /BOL 12/, /BOL 11/.

Die Einlagerungsstrecken (bzw. -kammern) und Querschläge (Variante AB1) werden mit sog. naturtrockenem/bergfeuchtem Salzgrus mit einem Feuchtigkeitsgehalt von ca. 0,02 Gew.-% versetzt. In den Richtstrecken wird ein mit 0,6 Gew.-% MgCl₂-Lösung angefeuchteter Salzgrus eingebracht /BOL 12/. Für die sog. Langzeitdichtung in den Schächten wird mit 1,5 Gew.-% gesättigter NaCl-Lösung angefeuchteter und auf 10 % Porosität vorkompakter Salzgrusversatz verwendet /MÜL 12b/, /MÜL 12a/.

3.2.4 Temperaturfeldberechnung

Im Rahmen der Auslegung des Endlagers für die Einlagerungsvariante B1 wurden Temperaturfeldberechnungen durchgeführt und in /LER 11a/ beschrieben. Bei diesen Rechnungen wurden für die Einlagerungsfelder mit wärmeproduzierenden Abfällen die Wärmeleistungen der Abfallarten HAW, DWR-UO₂, DWR-MOX und DWR-WWER berücksichtigt, die auch abdeckend für SWR-Abfälle sind.

Zusätzlich wurden als Grundlage für die Modellrechnungen der radiologischen Konsequenzenanalyse aus den Temperaturfeldrechnungen für eine ausgewählte Anzahl von Stützstellen im Endlager die Temperaturen und deren zeitliche Verläufe herangezogen. Diese befinden sich in den Einlagerungsstrecken im Ostflügel direkt am Behälter und in unterschiedlichen Abständen zu den Behältern, am Übergang von den Einlagerungsstrecken zum Querschlag und an den in Abb. 3.6 eingezeichneten Punkten in den Richtstrecken. Zusätzlich wurden die Temperaturverläufe an einigen Stützstellen im Infrastrukturbereich und im Westflügel ermittelt (Abb. 3.6). Aus der Vielzahl dieser Punkte wurden für die Modellrechnungen der radiologischen Konsequenzenanalyse repräsentative Stützstellen in den Richtstrecken, Querschlägen, Einlagerungsstrecken, im Infrastrukturbereich und im Westflügel ausgewählt und die zugehörigen Temperaturverläufe als Randbedingungen für die Modellrechnungen verwendet. Die Verwendung dieser Temperaturdaten wird im Kap. 3.3.1 und 4.3.1 ausführlich beschrieben. Beispielhaft sind in Abb. 3.7 die Temperaturverläufe an einigen ausgewählten Stützstellen (Abb. 3.6) dargestellt.

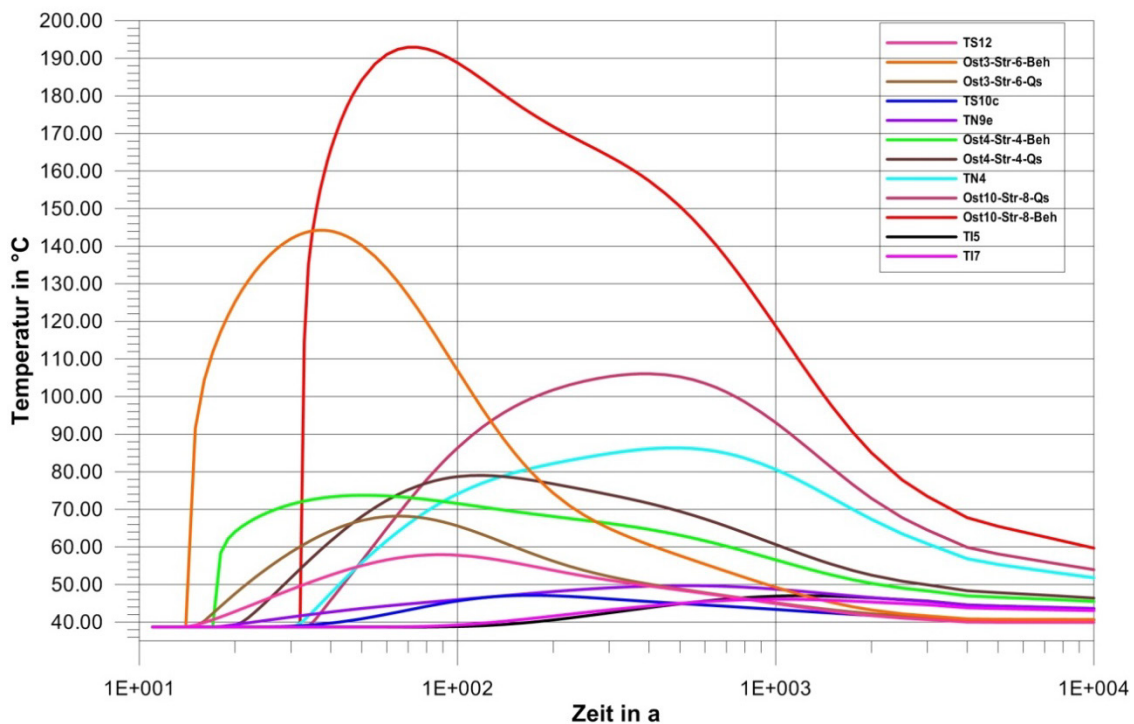


Abb. 3.7 Temperaturverlauf an einigen ausgewählten Stützstellen (Abb. 3.6) nach der Temperaturfeldberechnung von /LER 11a/

Die Lage der Punkte TS12, TS10, TS9, TN4, T15 und T17 kann der Abb. 3.6 entnommen werden. Die anderen Punkte bezeichnen spezifische Orte in den Einlagerungsstrecken (Beh. = Behälter) und Querschlägen (QS)

3.3 Prozessverständnis zum Endlagersystem

Im Endlagersystem spielen aus hydraulischer und fluiddynamischer Sicht insbesondere die im Folgenden genannten Abläufe und Prozesse eine Rolle. Nach Abschluss der Einlagerung der Abfälle werden die Einlagerungsbereiche des Grubenbaus mit Salzgrusversatz verfüllt. Für den möglichen Transport von Lösung und Gas bzw. damit auch der Radionuklide ist somit das Verhalten des Versatzes bei dem sich durch die Konvergenz des Salzgebirges aufbauenden Gebirgsdruck von Bedeutung (Kap. 3.3.1). In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Versatzes (z. B. Kompaktionsgrad) haben die verschiedenen Mechanismen, die den Transport von Lösung, Gas und Radionukliden beeinflussen, eine unterschiedliche Relevanz (s. Kap. 3.3.2). Bei der Betrachtung des Gastransports ist neben den Gasen, die im Endlager bereits vorhanden sind (Luft, ggf. auch Kohlenwasserstoffe), auch die Gasbildung infolge Korrosion und mikrobiellem Abbau von Bedeutung (s. Kap. 3.3.4).

3.3.1 Kompaktion des Versatzes

Die Salzgruskompaktion und die damit einhergehende Reduzierung der Porenräume im Versatz (Reduktion der Porosität bzw. Permeabilität) sind wesentlich für den sicheren Einschluss von radioaktiven Abfällen im Salz. Ausgehend von der vorliegenden experimentellen Datenbasis kommen BGR und IfG /POP 12/ zur Einschätzung, dass beanspruchungsdominierte und zeitabhängige Kompaktionsprozesse innerhalb eines Zeitraumes von weniger als tausend Jahren zu einer vollständigen Kompaktion von Salzgrus bis zu einer Porosität von Null führen (d. h. im Rahmen der Messungenauigkeit und unter Berücksichtigung des Einschlusses vorhandener Fluide zu einer Porosität von $1 \pm 1 \%$ führen, im Weiteren Restporosität genannt). Die Kompaktion des angefeuchteten Salzgrusversatzes in den Richtstrecken wird – bei gleicher Temperatur – im Vergleich zu dem des trockenen (gebirgsfeuchten) Salzgruses deutlich schneller bis zur Restporosität fortschreiten. Für die in den nachfolgenden Analysen verwendeten Ansätze zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus und deren Parametrisierung stellt die o. a. Restporosität von $1 \pm 1 \%$ als Endzustand der Kompaktion eine Randbedingung dar.

Insbesondere für die Abhängigkeit von der Temperatur und dem Feuchtegehalt des Versatzes, die sehr sensitiv in Bezug auf die Kompaktionsgeschwindigkeit sind, fehlen für die Beschreibung des Kompaktionsverhaltens durch Rechenmodelle belastbare Daten für sehr kleine Porositäten sowie Stoffgesetze. Insbesondere fehlen gesicherte Erkenntnisse zur erreichbaren Restporosität des Versatzes in Abhängigkeit von der Zeit, der Temperatur und dem Feuchtegehalt.

Aus diesen Gründen wurde entschieden, in die radiologische Konsequenzenanalyse der VSG ein vereinfachtes Kompaktionsmodell einzuführen, in dem die Temperaturabhängigkeit und die Abhängigkeit von der Feuchtigkeit des Salzgrusversatzes durch Parametervariationen abgebildet werden. Die Umsetzung der Abhängigkeiten erfolgt derart, dass die Porositäten des Versatzes in den Grubenbauen bei Atmosphärendruck zu unterschiedlichen vorgegebenen Zeitpunkten festgelegte Werte erreichen. Die Tabelle mit der Angabe der entsprechenden Porositätswerte und den zugehörigen Zeitangaben ist in Kap. 4.2.3 enthalten.

Grundlage der Parameterermittlung für die Berechnung der Kompaktion des Salzgrusversatzes sind Ergebnisse aus Rechnungen mit Code_Bright /COD 02/ zum Kompakti-

onsverhalten unterschiedlicher Salzgrusversätze bei verschiedenen Temperatureinwirkungen in den Strecken des Endlagers, die in /CZA 12/ zusammengestellt sind.

Als Einlagerungshorizont in Gorleben wurde gemäß dem Sicherheitskonzept der VSG /MÖN 12/ das Hauptsalz (z2HS) der Staßfurt-Folge, das vom Liegenden zum Hangenden aus den Formationen Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) und Kristallbrockensalz (z2HS3) besteht, vorgesehen. /HUN 03/ gibt für das Streifensalz (z2HS2) eine empfohlene Kriechklasse von 5 mit einer Schwankungsbreite von 3 – 6 an. Die Code_Bright-Rechnungen berücksichtigen daher die Kriechklassen 5 bzw. 3 (Abb. 3.8). Für die Anpassung des Kompaktionsansatzes in den nachfolgenden Modellrechnungen werden die Kurven der Kriechklasse 5 berücksichtigt und eine Unsicherheitsbandbreite der Kompaktionsgeschwindigkeit, die auch die Kriechklasse 3 weitgehend abdeckt, verwendet.

Zur Parameterermittlung für das vereinfachte Kompaktionsmodell werden die Strecken im Endlager je nach den zu erwartenden Temperaturbedingungen und dem Anfeuchtungsgrad des Salzgrusversatzes unterschiedlichen Kategorien zugeordnet. Für die Temperaturen werden nach Analyse der Temperaturverläufe an unterschiedlichen Stützstellen (Kap. 3.2.4) drei Kategorien gewählt: „heiß“, „warm“ bzw. „kalt“. Sie dienen als Basis für die Approximation der in Kap. 4.2.3 (Tab. 4.3) aufgeführten Zeitpunkte zum Erreichen der Salzgrusporosität von 5 %. Dabei wird insbesondere der Temperaturanstieg in den ersten 100 – 200 Jahren berücksichtigt, da in diesem Zeitraum die Kompaktion des Salzgrusversatzes entscheidend durch die Temperaturentwicklung beeinflusst wird (Abb. 3.8). Alle Einlagerungsstrecken im Ostflügel, die aufgrund der Einlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle einen schnellen Temperaturanstieg zeigen, werden der Kategorie „heiß“ zugeordnet, die Richtstrecken Nord und Süd, die direkt an wärmeentwickelnde Einlagerungsstrecken angrenzen, der Kategorie „warm“, ebenso die Querschläge und die Einlagerungsstrecken mit Abfällen, die eine geringere Wärmeentwicklung haben. Die Richtstrecken Nord und Süd, die keiner oder nur sehr geringer Wärmezufuhr ausgesetzt sind, erhalten wie alle Strecken im Westflügel und im Infrastrukturbereich die Kategorie „kalt“. Für den Feuchtegrad des Salzgrusversatzes werden zwei Kategorien gewählt: „trocken“ bzw. „feucht“. Als „trocken“ wird naturtrockener/bergfeuchter Salzgrus mit einem Feuchtigkeitsgehalt von ca. 0,02 Gew.-% bezeichnet. Dieser wird in die Einlagerungsstrecken und die Querschläge eingebracht. Als „feucht“ wird mit 0,6 Gew.-% $MgCl_2$ -Lösung angefeuchteter Salzgrus bezeichnet, der in die Richtstrecken eingebracht wird /BOL 12/. Damit ergeben sich insgesamt fünf

Kategorien für den Kompaktionsansatz: „trocken/heiß“, „trocken/warm“, „trocken/kalt“, „feucht/warm“ und „feucht/kalt“.

Abb. 3.8 zeigt die Ergebnisse der Rechnungen zum Kompaktionsverhalten mit Code_Bright /CZA 12/ für die Kriechklassen 5 bzw. 3. Der in der radiologischen Konsequenzenanalyse verwendete Kompaktionsansatz und die zugehörige Parametrisierung auf Basis der hier gezeigten Daten werden in Kap. 4.2.3 beschrieben.

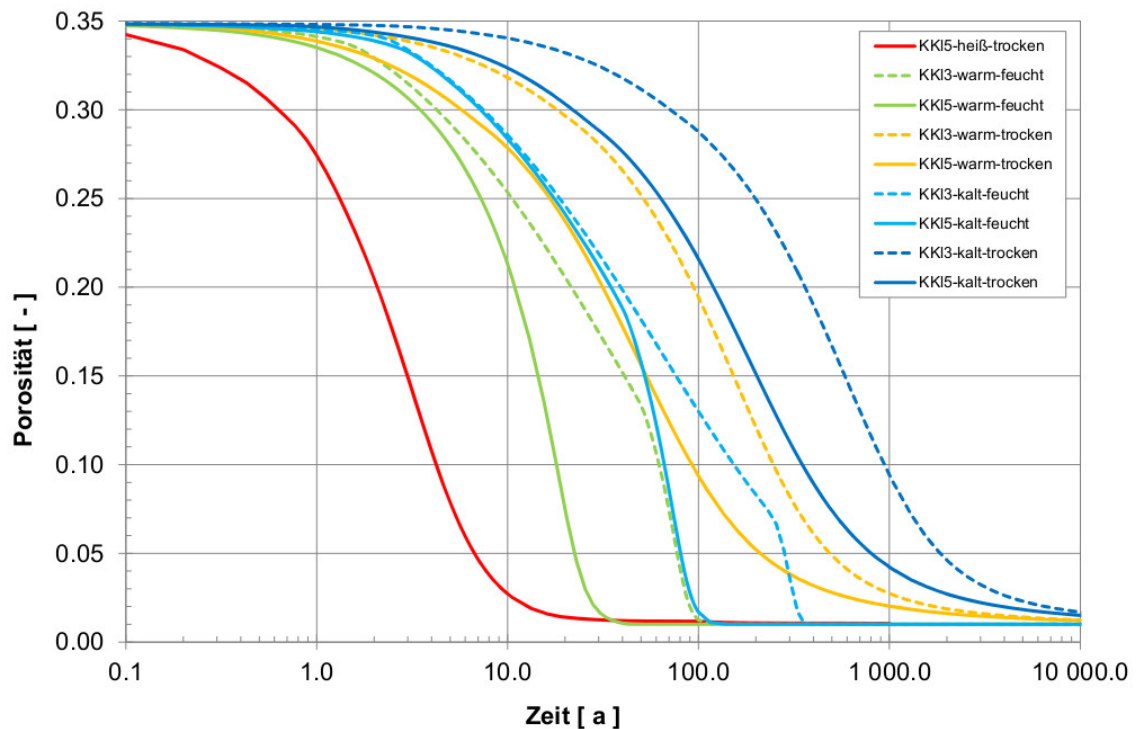


Abb. 3.8 Berechnung der Salzgruskompaktion mit Code_Bright in den Kriechklassen (KKI) 3 und 5 (nach /CZA 12/)

3.3.2 Advektion und Diffusion

Der Transport von Fluiden in einem porösen Medium kann durch mehrere Mechanismen erfolgen. Für miteinander verbundenen Porenraum bei großer Porosität hat der Prozess des Fluidflusses die größte Bedeutung. Der Prozess der Flüssigkeitsströmung in porösen Medien kann durch das Darcy-Gesetz beschrieben werden:

$$Q = -k_f * i * A \quad (3.1)$$

Dabei ist der Durchfluss Q (in m^3/s) proportional zum hydraulischen Gradienten i , zum Querschnitt A (in m^2) und zum sog. Durchlässigkeitsbeiwert k_f (in m/s). Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f ist abhängig vom durchströmenden Medium (z. B. Wasser oder Öl). Zur Beschreibung einer vom durchströmenden Medium unabhängigen Durchlässigkeit wird die intrinsische Permeabilität K (in m^2) genutzt, die den Durchlässigkeitsbeiwert k_f mit der dynamischen Viskosität des durchströmenden Fluids η_F sowie dessen Dichte ρ_F und der Gravitationsbeschleunigung g verknüpft:

$$k_f = \frac{K * \rho_F * g}{\eta_F} \quad (3.2)$$

Damit ist der Durchfluss Q im Darcy-Gesetz abhängig von einem Materialparameter des porösen durchströmten Mediums. Durch die fortschreitende Konvergenz und die damit verbundene Kompaktion des Versatzes (s. Kap. 3.3.1) ändert sich dieser Materialparameter. Mit der Reduktion der Porosität verbunden ist eine Verringerung der Permeabilität. Eine Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung (Poro-Perm-Beziehung) der Form

$$K = A * \phi^n \quad (3.3)$$

wobei K die intrinsische Permeabilität, ϕ die Porosität und A und n Materialparameter sind, wird aufgrund der Datenlage vielfach vorgeschlagen (s. /KRÖ 09/, /WIE 12/). Dabei ist die Datengrundlage im Bereich hoher Porosität recht gut, aber für Bereiche niedriger Porosität ist die Datenlage unzureichend und zusätzliche Forschung notwendig.

/KRÖ 09/ stellt in Abb. 3.9 in einer zusammenfassenden Darstellung die hydraulischen Daten aus vorliegenden Untersuchungen, die zumindest für Trendaussagen geeignet sind, dar. Im Weiteren wird der Einfluss der Sieblinie und des Versuchstandstyps diskutiert und eine Extrapolation der vertrauenswürdigen Daten für die Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung durchgeführt (s. Abb. 3.10).

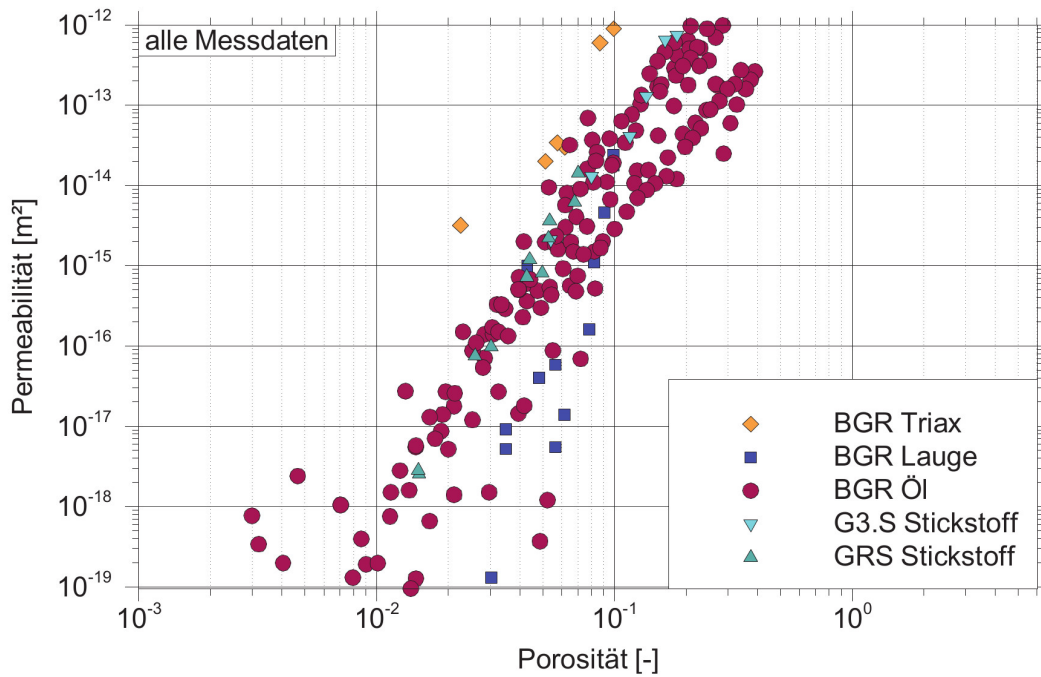


Abb. 3.9 Alle für Trendaussagen im Bereich $\Phi < 10\%$ geeignet erscheinenden hydraulischen Messdaten (nach /KRÖ 09/)

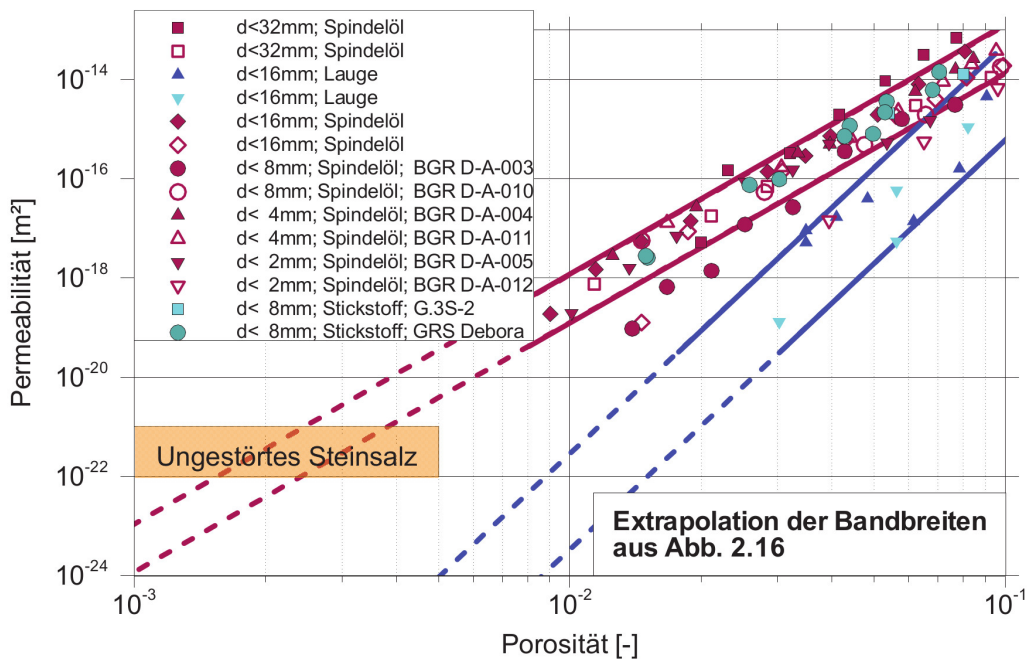


Abb. 3.10 Extrapolation der Bandbreite der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung (nach /KRÖ 09/)

Auf Basis der Ergebnisse in /KRÖ 09/ wurden für die VSG in /WIE 12/ die Daten weiter aufgearbeitet und eine Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung für den Gaspfad und den Lösungspfad hergeleitet (s. Abb. 3.11).

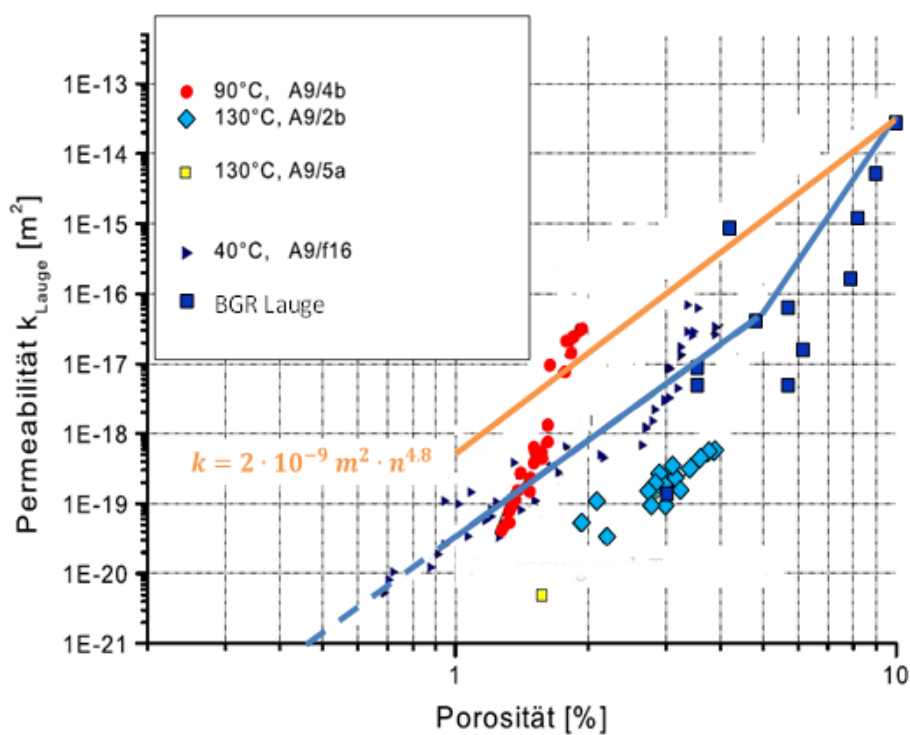


Abb. 3.11 Gas- und Laugenpermeabilität von Salzgrus (Poro-Perm-Beziehung nach /WIE 12/)

Die unterschiedliche Farbgebung zeigt unterschiedliche Messungen, z. B. bei erhöhter Temperatur /ELL 04/ und Einspanndruck von mindestens 4 MPa sowie Laugenmessungen der BGR. Die blaue Kurve zeigt die vorgeschlagene Kurvenanpassung mit den Parametern aus Tab. 3.3 (verändert nach /WIE 12/).

Die BGR/IfG kommen in einem Grundlagenpapier zur Darstellung des allgemeinen Kenntnisstandes der Salzgruseigenschaften vor dem Hintergrund des Kenntnisstandes von Technik und Wissenschaft /POP 12/ zu dem Ergebnis:

- „Die zur Begünstigung der Kompaktionseigenschaften eingebrachte Feuchtigkeit liegt zunächst als Haftwasser oder lokale Laugentröpfchen im Porenraum vor. Wie mikro-strukturelle Beobachtungen nachweisen, werden mit fortschreitender Salzgruskompaktion ehemals vorhandene Laugenfilme sukzessive unterbrochen und die Feuchtigkeit in Kornzwickeln oder isolierten Laugenschlüssen akkumuliert. Gleichzeitig nimmt der relative Sättigungsanteil der zur Befeuchtung eingebrachten Salzlösung im Restporenraum sukzessive zu und der lokale Porendruck steigt an.“

Trotzdem kommt es nicht zu einem Auspressen von Fluiden, da infolge der dadurch vorliegenden 2-Phasenflusseffekte extrem abgeminderte relative Fluidpermeabilitäten und hohe kapillare Sperrdruckeffekte wirksam werden.“

- „Ausgehend von der vorliegenden experimentellen Datenbasis wird eingeschätzt, dass infolge der Überlagerung beanspruchungs-dominierter und zeitabhängiger Kompaktionsprozesse auch bei Erreichen eines isostatischen Belastungszustandes die Versatzkompaktion nicht zum Stillstand kommt, sondern innerhalb eines Zeitraumes von weniger als tausend Jahren über Kriechen (s. ob.) zu einer vollständigen Kompaktion von Salzgrus bis zu einer Porosität von Null führt (d. h. summarisch von $1\pm 1\%$ mit Einschluss vorhandener Fluide). Insofern stellt eine mit konstanten, wenn auch kleinen Verformungsraten abgeleitete Versatzdruckkurve keine ausreichende Basis zur Ableitung einer Funktion zur Porositätsentwicklung bei gegen Null gehender Porosität dar“.
- „Somit sind die mittels Salzlösung bestimmten Kennwerte bzw. die resultierenden Permeabilitäts-Porositäts-Beziehungen anzusetzen. Sie weisen für die als Langzeitwert in VSG angesetzte Endporosität von $1\pm 1\%$ eine Durchlässigkeit auf, die der von unverritztem Steinsalz gleichkommt ($< 10^{-22} \text{ m}^2$). Berücksichtigt man noch die bereits vorher angesprochenen 2-Phasenflusseffekte, folgt als Konsequenz, dass advective Stofftransportprozesse bei diesen sehr kleinen Permeabilitäten ($< 10^{-20} - 10^{-22} \text{ m}^2$) für Ausbreitungsrechnungen praktisch vernachlässigt werden können.“

In der VSG wurde eine einheitliche Vorgehensweise gewählt und die Parametrisierung, die in Tab. 3.3 dargestellt ist, anhand der in Abb. 3.11 gezeigten Daten festgelegt.

Tab. 3.3 Parametrisierung der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung

Porositätsbereich	A [m^2]	n
$0,1 < \phi < 1$	$2,00 \cdot 10^{-09}$	4,8
$0,05 < \phi < 0,1$	$6,70 \cdot 10^{-05}$	9,32
$\phi_{\text{Grenzporosität}} < \phi < 0,05$	$4,99 \cdot 10^{-11}$	4,61

Damit weist Salzgrusversatz formal für die angenommene Endporosität von 1 % eine Permeabilität von ca. $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ auf. In /POP 12/ wird jedoch eingeschätzt, dass die Permeabilität von kompaktiertem Salzgrusversatz bei 1 % Porosität der Permeabilität von unverritztem Steinsalz ($< 1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$) entspricht. Bei dieser Porosität kommt nach

/POP 12/ der Lösungstransport zum Erliegen, da keine zusammenhängenden Porenräume und damit keine Transportwegsamkeiten mehr existieren oder der hydraulische Widerstand extrem groß wird, so dass ein lösungstragender Transport praktisch vernachlässigt werden kann. Dies gilt auch unter der Berücksichtigung von Zweiphasenfluss, wobei hier möglicherweise noch kapillare Sickerdruckeffekte hinzutreten, die die Advektion zusätzlich erschweren.

Die in /POP 12/ aufgeführten Empfehlungen zur Parametrisierung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften als Basis für Modellrechnungen von Salzgrus im Rahmen der VSG gelten als Prämisse der nachfolgenden Rechnungen der radiologischen Konsequenzenanalyse, insbesondere der Rechnungen zum Lösungspfad mit MARNIE für das Referenzszenarium und der Alternativszenarien. Die vorliegenden Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse sind daher im Rahmen einer Nachweisführung unter Vorbehalt der experimentellen Untermauerung der dort beschriebenen Ergebnisse zu werten.

Trotz der oben beschriebenen Effekte wird im Berechnungsprogramm TOUGH2 die oben erwähnte und in Tab. 3.3 parametrisierte Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung angenommen, die bei einer Porosität größer als Null immer zu einer positiven Permeabilität und damit zur Modellierung von Fluidströmung und advektiven Transport führt.

Eine ausführlichere Betrachtung von Zweiphasenflussprozessen im Medium Salzgrusversatz findet sich in /WIE 12/.

Im Falle eines advektiven Transports führt die Verringerung der Permeabilität und die bei gleichbleibendem Gradienten damit einhergehende Abnahme der Advektion dazu, dass der diffusive Transport, dessen Beitrag zum Fluidtransport in der Anfangsphase der Kompaktion des Salzgruses viele Größenordnungen geringer als der advektive Beitrag ist, an Bedeutung gewinnt. Erreicht die Kompaktion von Salzgrus die Endporosität, so liegen keine zusammenhängenden Porenräume (unter Berücksichtigung des Einschlusses vorhandener Fluide) mehr vor.

Die Möglichkeit eines lösungsgetragenen Transports möglicher Schadstoffe ist – wenn überhaupt – dominiert durch Diffusion entlang der Korngrenzen. Der Transport durch Diffusion J ist proportional zum Konzentrationsgradienten $\frac{\delta c}{\delta x}$ und einem Materialparameter, dem sog. molekularen Diffusionskoeffizienten D :

$$J = - D \cdot \frac{\delta c}{\delta x} \quad (3.4)$$

Die Werte für molekulare Diffusionskoeffizienten in freien Lösungen wie Wasser oder Lauge bewegen sich bei 25 °C im Bereich von $1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Der Diffusionskoeffizient aus Gleichung (3.4) kann für ein Molekül oder ein Partikel mit dem hydrodynamischen Durchmesser r_h nach der Stokes-Einstein-Gleichung in Abhängigkeit von der Boltzmann-Konstante k_B , der Temperatur T und der dynamischen Viskosität des Wassers η berechnet werden.

$$D = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_h} \quad (3.5)$$

In porösen Medium wird die Diffusionskonstante von der Tortuosität τ , der Porosität n und von einem Geometriefaktor δ beeinflusst /APC 05/. Zusammen mit diesen Faktoren kann eine sogenannte effektive Diffusionskonstante D_e angegeben werden.

$$\tau = \left(\frac{l_{eff}}{l} \right)^2 \text{ für } l_{eff} \geq l \quad (3.6)$$

$$D_e = D \cdot \frac{\delta \cdot n}{\tau} \quad (3.7)$$

Die Tortuosität berücksichtigt die Gewundenheit des Transportweges (z. B. entlang von Korngrenzen), indem der effektive zurückgelegte Weg l_{eff} durch den direkten Abstand l geteilt wird. Sie hat immer einen Wert $\tau \geq 1$ und nimmt mit kleinerer Porosität zu, da hier l_{eff} gegenüber l größer wird. In /ELL 04/ ist die Tortuosität im Salzgrus abhängig von der Porosität (Gleichung (3.8)) definiert worden. Es wird in /ELL 04/ die Arbeit von /CIN 00/ zitiert, in der für den Faktor s ein Wertebereich von $2,25 \leq s \leq 2,75$ angegeben wird.

$$\tau^2 = n^{1-s} \quad (3.8)$$

Unter Berücksichtigung der oben genannten Effekte gibt /GRP 98/ eine Korrelation zwischen der relativen Diffusionskonstante $D' = D_e/D$ und der Porosität an (Abb. 3.12). Bei einer Porosität von 1 % ist die effektive Diffusionskonstante an der oberen Wertebereichsgrenze (grauer Bereich in Abb. 3.12) für natürliche poröse Medien ($D' = \epsilon^{3/2}$) um einen Faktor $1 \cdot 10^3$ kleiner als die Diffusionskonstante in freiem Wasser, bei 2 % ergibt sich eine Verminderung um den Faktor 350 ($D' = \epsilon^{3/2}$).

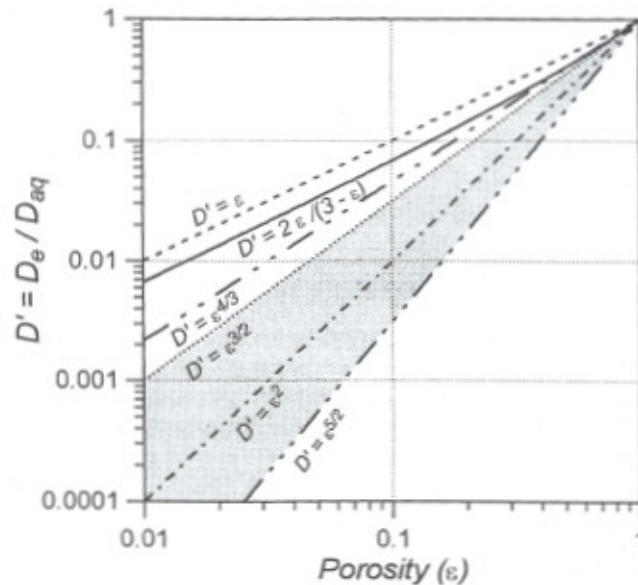


Abb. 3.12 Vergleich von relativer Diffusionskonstante D' zur Porosität /GRP 98/

Die grau unterlegte Fläche zeigt den Bereich der Werte von natürlichen porösen Medien an.

Als obere Grenze für die nachfolgenden Rechnungen der radiologischen Konsequenzenanalyse wird zu den Referenz- und Alternativszenarien ein Diffusionskoeffizient unter Berücksichtigung der Tortuosität von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ verwendet.

3.3.3 Kohlenwasserstoffe

Die Studie /BRA 12/ untersucht die Kohlenwasserstoffvorkommen (KW-Vorkommen) in Gorleben sicherheitstechnisch. Sie beruht auf einem allgemeinen Prozessverständnis zum Vorkommen von KW in Salzgesteinen und den daraus im Zusammenhang mit einer Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle unterstellten resultierenden geochemischen und hydromechanischen Wechselwirkungen. Die daraus gefolgerten Ergebnisse sind nicht abschließend, da sowohl grundsätzlich als auch standortspezifisch noch Ungewissheiten vorhanden sind, die sich nur im Rahmen einer weiteren

Erkundung sowie einer spezifischen Forschung verringern lassen. Als möglicher wichtiger Prozess wurde bislang die thermochemische Sulfatreduktion identifiziert.

Die auf dem gegenwärtigen Kenntnissstand für die VSG abgeschätzten KW-Vorkommen /WEB 11/ belaufen sich auf Werte in der Größenordnung von ca. 3 l pro POLLUX[®]-Behälter im konturnahen Bereich um einen POLLUX[®]-Behälter.

Die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) bildet unter der Annahme von 3 l KW (2,7 kg) als Oktan im Umfeld eines POLLUX[®]-Behälters maximal ca. 190 mol H₂S, welches unter Normalbedingungen ein Gasvolumen von ca. 4,25 m³ einnimmt /BRA 12/. Der Ablauf der thermochemischen Sulfatreduktion ist temperaturabhängig. Das Ergebnis einer Literaturrecherche unterstützt die Annahme, dass die TSR bei Temperaturen von < 80 °C innerhalb des Nachweiszeitraumes aufgrund der geringen Umsatzraten als bedeutungslos eingestuft werden kann. Somit wird eine TSR nur im Ostflügel mit den wärmeentwickelnden Abfällen berücksichtigt.

Die KW-Vorkommen erscheinen nach /BRA 12/ aus geochemischer Sicht und aufgrund abdeckender Annahmen sowohl hinsichtlich der Gasbildung als auch für Korrosionseffekte und Komplexierung von Radionukliden (geochemisches Milieu) sicherheitstechnisch als unbedeutend.

Auf der Grundlage des heutigen Kenntnisstandes werden keine Hinweise für eine sicherheitsrelevante Beeinflussung hydromechanischer Prozesse durch eine thermochemische Sulfatreduktion (TSR) mit KW festgestellt /BRA 12/.

3.3.4 Gasbildung und Lösungsangebot im Grubengebäude

/FRI 12/ beschreibt die im Endlager ablaufenden Gasbildungsprozesse mit ihren Randbedingungen, die zum Modellaufbau des Gastransportes benötigt werden. Grundsätzlich gilt, dass die Korrosionsprozesse, die zu einer Gasbildung führen, vom Lösungsangebot abhängig sind, da die in das Endlager eingebrachten Metallmassen erheblich sind /FRI 12/. Ohne den Zutritt großer Lösungsmengen zu den Behältern bleibt die Gasbildung durch die initial vorhandene Lösungsmenge aus dem Salzgrus bzw. der thermischen Sulfatreduktion (TSR) und den Endlagergebänden begrenzt /BEU 12/.

Im Endlager sind nachfolgende Gasbildungsprozesse möglich. Die erwartete bzw. gebildete absolute Gasmenge im Endlager wird in der Reihenfolge der Aufzählung geringer:

- Gasbildung durch aerobe und anaerobe Metallkorrosion
- Gasbildung durch mikrobielle Prozesse (Zersetzung von Organika)
- Thermochemische Sulfatreduktion (TSR)
- Flüchtige Kohlenwasserstoffe
- Radiolytische Gasbildung

Überschlägige Rechnungen zeigen /FRI 12/, dass die anaerobe Eisenkorrosion zur volumenmäßigen Betrachtung der Gasbildung bestimmend gegenüber allen anderen Prozessen ist. Die anaerobe Metallkorrosion der Endlagerbehälter läuft im Vergleich zu anderen Gasbildungsprozessen schneller ab und die abfallnah eingebrachten Lösungen sind mit diesem Prozess verbraucht, so dass danach kein anderer Gasbildungsprozess stattfindet. Aufgrund der Mengenverhältnisse der Organika und Metalle sowie der relativen Reaktionsgeschwindigkeiten der Prozesse ist davon auszugehen, dass in der frühen Nachverschlussphase die Gasbildung durch die anaerobe Korrosion der Metalle überwiegt /BEU 12/.

Feuchtigkeit im Grubengebäude

Feuchtigkeit im Abfall und im Umfeld der Endlagergebinde führt zur Metallkorrosion der Endlagerbehälter. Die Feuchtigkeits- bzw. Lösungsmenge ist dabei der limitierende Faktor bei der Korrosion, da genügend Metall zur Verfügung steht /FRI 12/. Das initiale Lösungsangebot ist abhängig von der Feuchtigkeit eingebrachter Materialien und von wasserbildenden Prozessen. Im Folgenden sind die wichtigsten Quellen einer Feuchtigkeit aufgeführt:

- Abfallgebinde (Abfall, Behältermaterial bzw. Zement-Konditionierung)
- Salzgrusversatz
- Thermochemische Sulfatreduktion

Zur Berechnung der zur Korrosion verfügbaren Lösungsmengen werden nur die mobilen Feuchteanteile aus den Abfallgebänden, dem Salzgrusversatz und der thermoche-

mischen Sulfatreduktion herangezogen. Die gebundene wässrige Lösung im Beton der Endlagerbehälter und in der Konditionierung wird als immobil angenommen. Als Grundlage zur Bestimmung der Feuchtigkeitsmengen in den Abfällen dienen die in /BOL 11/, /DÖR 12/, /PEI 11a/ beschriebenen Abfall- und Behälterspezifikationen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Feuchtemengen nur ungefähre obere Abschätzungen sind, da belastbare Aussagen über Feuchtemengen in Abfällen und Behältern nicht genau vorhersagbar sind /PEI 11a/. Die Feuchtemengen stehen modelltechnisch sofort zur Korrosion von Anteilen der in /FRI 12/ dargestellten Metallmassen zur Verfügung.

Tab. 3.4 Initiale Lösungsmengen pro Behälter, für den Ost- und Westflügel

Abfallart	Behältertyp/ Anzahl	Mobiler Wasser- gehalt in den Ab- fällen pro Behälter [kg] ¹	Feuchte aus Salzgrus pro Behälter [kg]	Feuchte aus der TSR pro Behälter [kg]	Summe Feuchte Salzgrus + Abfall + TSR pro Behälter [kg] ¹
Abfälle aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraft- werken und For- schungsreaktoren	CASTOR® 511	0,12 (18)	14,46		14,58 (32,46)
Radioaktive Abfälle aus der Wiederauf- arbeitung	POLLUX®-9 906	15,6 (18)	34,47	3,40	51,47 (55,87)
Ausgediente Brennelemente aus Leistungs- reaktoren	POLLUX®-10 2120	0,06 (18)	34,22	3,40	37,68 (55,62)
Verpresste Strukturteile	Gussbehälter Typ II 2620	1,91	0,32	-	2,23
Urantails	Containertyp VI (Stahl) 7217	77,59	1,15	-	78,74
Graphitabfälle	Containertyp IV (Beton) ² 313	35,14	2,09	-	37,23
Sonstige Abfälle	Container Typ IV (Stahl)	506,19	1,3	-	507,49
	Gussbehälter Typ II	47,73	0,41		48,14
	Betonbehälter Typ I 1695/1150/800	20,125	0,49		20,615

¹ Die Werte in Klammern, sind ältere Abschätzungen, die in /KOC 12/ und einigen Rechnungen zum Gas-transport (Kap. 4.3.3) verwendet werden. (Angaben nach /DÖR 12/, s. a. /FRI 12/)

² Die Behälteranzahl bezieht sich auf die in /BOL 11/ erfolgten Angaben. In /DÖR 12/ werden davon abweichend 2.300 Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung genannt. Die Gesamtmasse an Feuchtigkeit in den Abfällen ändert sich dadurch nicht.

Gasbildung

Die Behältermaterialien bestehen aus unedlen Metallen, insbesondere Eisen und Aluminium, und unterliegen in Gegenwart von Sauerstoff der aeroben Korrosion ohne Gasbildung. Allerdings wird der verfügbare Sauerstoff im Endlager innerhalb weniger Jahre nach dem Verschluss verbraucht. Aufgrund der Mengenverhältnisse sowie der relativen Reaktionsgeschwindigkeiten der Prozesse überwiegt in der frühen Nachverschlussphase die Gasbildung durch die anaerobe Korrosion der Metalle. Bei der anaeroben Korrosion werden unedle Metalle wie Eisen, Aluminium und Zink durch Wasser oxidiert. Als Produkte entstehen Wasserstoff und die entsprechenden Metalloxide und -hydroxide. Auch Zirkon kann durch Wasser korrodiert werden. Zirkon ist Bestandteil der Brennstabhüllrohre und der Brennelementstrukturteile. Im Vergleich zu den oben erwähnten Metallen ist die Korrosion von Zirkon relativ langsam. Als primärer Gasbildungsprozess wird die Korrosion von Eisen unterstellt.

Korrosionsraten

Ein Überblick über die Bandbreite möglicher Korrosionsraten unter Endlagerbedingungen ist in /MÖH 11/ zusammengestellt. Die Korrosionsraten für verschiedene Metalle bei unterschiedlichen Bedingungen wurden durch experimentelle Untersuchungen über begrenzte Versuchszeiträume bestimmt und für die langen Zeiträume der Korrosion im Endlager extrapoliert. Die Korrosionsreaktion findet an der Oberfläche der Metalle statt. Aus diesem Grund ist die Gasbildung nicht proportional zur Masse, sondern zur Oberfläche der Metalle /SKR 05/. Für die Korrosionsraten werden in /MÖH 11/ Bandbreiten z. T. bei verschiedenen Flüssigkeitssättigungen angegeben. Die nachfolgenden Tab. 3.5 und Tab. 3.5 aus /MÖH 11/ fassen die Ergebnisse zum äußeren Korrosionsverhalten des POLLUX[®]-Behälters zusammen. Die Korrosion im Inneren des Behälters verläuft (mit ca. 25 µm/a in den ersten zehn Jahren) bei einer Restfeuchte des Abfalls bei 200 °C und unter einem Einfluss der Strahlung von bis zu 10 kGy/h ab. Hierbei handelt es sich um eine Dampfkorrosion. Sie ist Grundlage der in Kap. 4.2.5 beschriebenen Modellvorstellung zur instantanen Freisetzung eines Anteils der Radionuklide (IRF). Im „*trockenen Szenario*“ nach /MÖH 11/ wird die verfügbare Feuchtemenge auf der Außenseite des Behälters durch die angenommene Restfeuchte (in /MÖH 11/ für ungetrocknetes Haldensalz mit 2,5 % Feuchtigkeit) begrenzt. Im „*feuchten Szenario*“ nach /MÖH 11/ wird für die Korrosion in wässriger Lösung eine deutlich höhere Korrosionsrate erwartet /SMA 96/.

Tab. 3.5 Außenkorrosion "trockenes Szenario" aus /MÖH 11/

POLLUX®	Korrosionsrate	Eindringtiefe	Erliegen der Korrosion
Innenbehälter	keine	Keine	Keine
Abschirmbehälter	15 µm/a	21 mm	1.430 Jahre

Tab. 3.6 Außenkorrosion "feuchtes Szenario" aus /MÖH 11/

POLLUX®	Korrosionsraten	Durchkorrodieren der Wandstärken
Innenbehälter	150 µm/a (bis 10 a) 100 µm/a (nach 10 a)	1.600 Jahre (Behälterkörper) 500 Jahre (Schweißnaht zwischen Behälterkörper und Sekundärdeckel)
Abschirmbehälter	150 µm/a (bis 10 a) 100 µm/a (nach 10 a)	2.700 Jahre (Behälterkörper)- keine Schweißverbindung zwischen Abschirmbehälter und Abschirmdeckel

4 Modellaufbau & Parameterermittlung

4.1 Verwendete Programmcodes

Für die hydraulischen und fluiddynamischen Analysen werden unterschiedliche Berechnungsprogramme (Programmcodes) verwendet, die sich hinsichtlich der Bewertung der Prozesse, die das Einschussvermögen des Endlagersystems bestimmen, ergänzen und im Gesamtergebnis eine abdeckende radiologische Langzeitaussage erlauben. Für den Einphasenfluss wird das von der GRS entwickelte Rechenprogramm **MARNIE** (**M**odell zur **A**usbreitung von **R**adio**N**ukliden **I**m **E**ndlager**B**erg**w**erk; /MAR 02/) und für den Zweiphasenfluss das Programm **TOUGH2** (**T**ransport of **U**nsaturated **G**roundwater and **H**eat; /PRU 99/) benutzt. MARNIE ermöglicht die Berechnung des lösungsgetragenen Stofftransportes unter Berücksichtigung relevanter Phänomene für eine unbegrenzte Anzahl von Stoffkomponenten. Mit TOUGH2 wird die Berechnung des advektiven und diffusiven Stofftransports für die Gas- und Flüssigphase durchgeführt, wobei der Radionuklidtransport auf zwei Radionuklide begrenzt ist.

Im Folgenden werden die Grundsätze und Funktionsweise der beiden Rechenprogramme MARNIE und TOUGH2 beschrieben.

4.1.1 Das Programm MARNIE

Das Rechenprogramm MARNIE wurde zur Simulation der komplexen Stofftransportprozesse in einem lösungserfüllten Endlager in einer Salzformation von der GRS Köln im Auftrag des BMU entwickelt. Eine ausführliche Beschreibung enthält /MAR 02/.

Die Anzahl der in den Transportprozessen zu berücksichtigenden Stoffkomponenten ist nicht begrenzt. Stoffkomponenten, im Folgenden kurz Komponenten genannt, können sowohl Radionuklide als auch stabile Komponenten (z. B. Salz, Elemente) sein, wobei die Radionuklide zu einer ebenfalls beliebig großen Anzahl von Zerfallsketten gehören können.

Das Programm wurde so konzipiert, dass alle für den Lösungstransport relevanten FEP in einem Endlagerbergwerk simuliert werden können. Hierzu gehören z. B. advektiver, dispersiver und diffusiver Transport von Lösung und Komponenten, Konvergenz der Hohlraumvolumina, Kompaktion des Versatzes, radioaktiver Zerfall der Nuklide,

Freisetzung der Komponenten aus den Behältern, Löslichkeitsbegrenzung und Ausfällung der Komponenten in bzw. aus der Lösung, Sorption und Desorption von Komponenten am Feststoff.

MARNIE ist ein eindimensionales, gekoppeltes, instationäres Netzwerkprogramm. Die Transportprozesse werden in sogenannten Modulen berechnet, die je nach Zuweisung der physiko-chemischen Parameter als Modelle u. a. für Strecken mit und ohne Strömungsbarrieren, Einlagerungskammern, Bohrlöcher, Schächte, Hohlräume, Dämme, Verschlüsse und Stopfen fungieren. Als Randbedingungen können Druck oder Massenstrom vorgegeben und Komponenten eingespeist werden. Mit Hilfe dieser Randwerte werden die Ein- und Ausstrompfade aus dem Endlager, die an beliebigen Orten und in beliebiger Anzahl vorgegeben werden können, definiert.

Zur numerischen Lösung der Transportgleichungen für skalare Größen wird in MARNIE das „Finite-Volumen-Verfahren“ verwendet, wohingegen die Vektorgrößen eines finiten Volumens mit Hilfe des „Finite-Differenzen-Verfahrens“ gelöst werden.

Es werden folgende Gleichungen gelöst:

- die Kontinuitätsgleichung für das Gesamtfluid (bestehend aus Lösung und gelösten Komponenten) zur Berechnung des Druckes,
- die Impulsgleichung zur Ermittlung des Gesamtfluidstromes,
- die Bilanzgleichung zur Berechnung der Konzentrationen der gelösten Komponenten.

Dabei können u. a. folgende Phänomene berücksichtigt werden /MAR 02/:

- Strömung sowohl durch poröse Medien (Darcy-Strömung) als auch durch offene Systeme (Navier-Stokes-Strömung),
- Konvergenz der Hohlraumvolumina und die dadurch bedingte Kompaktion des Versatzes,
- Temperatureinflüsse auf den Stofftransport und auf die Kompaktion des Versatzes durch Vorgabe von Temperatur-Zeitverläufen,
- advektiver, dispersiver und diffusiver Transport der Komponenten,

- radioaktiver Zerfall der Radionuklide sowohl als Einzelzerfall als auch in Zerfallsketten,
- Einspeisung von Komponenten entweder über vorgegebene Zeitfunktionen oder Berechnung der Freisetzung der Stoffe aus den Behältern mit Hilfe von mathematischen Mobilisierungsmodellen,
- Berücksichtigung der Löslichkeitsbegrenzung der Komponenten,
- Berechnung der Sorptions- und Desorptionsprozesse mit Hilfe der Adsorptionsisotherme nach Henry, Freundlich oder Langmuir.

Beschreibung des physikalischen Modells für ein Endlager im Wirtsgestein Salz

In MARNIE wird zwischen der Langzeitphase, d. h. dem vollständig lösungsgefüllten Zustand eines Teilbereichs oder des gesamten Endlagers, und der Einlaufphase, d. h. dem Zeitraum vom nicht lösungs gesättigten Zustand bis zum Zeitpunkt des Erreichens der Langzeitphase, unterschieden.

Der Einstrom in der Einlaufphase wird aus dem Gradienten zwischen dem Fluiddruck der lösungsgefüllten und den nicht lösungs gesättigten Bereichen sowie aus den Strömungswiderständen berechnet. Für nicht lösungs gesättigte Bereiche des Endlagers wird Atmosphärendruck angenommen. Eventuell freigesetzte Lösungen aus benachbarten Lösungsreservoirs werden als Massenstrom vorgegeben. Ist eine Strecke lösungs gesättigt, geht sie in die Langzeitphase über.

In der Einlaufphase wird für alle mit Salzgrus versetzten Strecken des Endlagers die Porositätsänderung, die aus der Konvergenz der Hohlräume und der damit einhergehenden Kompaktion des Salzgrusversatzes resultiert, berechnet. Die zugehörige Permeabilität wird anhand der in Kap 3.2 beschriebenen Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung bestimmt. Die in den eingelagerten Behältern enthaltenen Inventare an Radionukliden werden für jeden Zeitschritt unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls bestimmt und die eventuelle Mobilisierung dieser Radionuklide aus den Behältern und der Abfallmatrix bei Lösungszutritt ermittelt. Dabei kann ein vorgegebener Einlagerungsplan berücksichtigt werden.

Aus den Aktivitäten der während der Einlaufphase aus den Behältern in eine Strecke freigesetzten und/oder eventuell aus bereits lösungsgefüllten Bereichen in ungesättigte Bereiche zugeströmten Radionuklide werden beim Übergang in die Langzeitphase

(vollständige Lösungssättigung) in MARNIE Anfangskonzentrationen für die betrachteten Radionuklide berechnet.

Zur Berechnung des Transportes von Fluid und Komponenten in der Langzeitphase werden Gleichungen für die Gesamtfluidmasse, die Komponentenmassen und dem Impuls der Gesamtfluidmasse gelöst. Die Transportgleichung für die Energie wird nicht explizit gelöst, der Einfluss der Energie auf den Transport wird mit Hilfe der Vorgabe eines orts- und zeitabhängigen Temperaturfeldes berücksichtigt. Dabei wird die Rückwirkung des Transportes auf das Temperaturfeld vernachlässigt.

Zur Lösung der Transportgleichungen müssen für die folgenden Größen und Prozesse Ansätze formuliert werden: Konvergenz- bzw. Kompaktionsverhalten, Porositätsentwicklung des kompaktierbaren Versatzes, zugehörige Permeabilitäten bei Kompaktion des Versatzes, Reibungsansätze, Dichte des Fluids, dynamische Viskosität des Fluids, Sättigungskonzentration des Salzes, Mobilisierung der Komponenten aus der Abfallmatrix, radioaktiver Zerfall, Ausfällungs- und Lösungsvorgänge, Gasbildung.

Abhängig von der Komplexität der zu modellierenden Größen können diese entweder durch algebraische Beziehungen oder durch Differentialgleichungen ausgedrückt werden.

Charakteristisch für ein Endlager im Wirtsgestein Salz ist die durch das Kriechen verursachte Hohlraumreduzierung (Konvergenz) und die Kompaktion des Salzgrusversatzes, die im Wesentlichen von der Porosität der versetzten Hohlräume, der Temperatur und der Druckdifferenz zwischen dem Salzgestein und den Hohlräumen abhängig ist. Die hierdurch ausgelösten Prozesse, u. a. resultierende dynamische Parameteränderungen, wie etwa die Veränderung von Strömungswiderständen der einzelnen Teilbereiche des Grubengebäudes, und ihr Einfluss auf den Fluidtransport, werden von MARNIE berechnet. Es werden sowohl die Einlaufphase für Lösungen in das Endlager als auch die Auspressphase von Lösungen analysiert. Während der Einlaufphase werden die Hohlraum- und Porenvolumina durch die von der Konvergenz ausgelöste Kompaktion reduziert, in der Langzeitphase ist die Konvergenz eine direkte Ursache für den advektiven Fluidtransport. Sie verursacht durch die Reduktion der lösungsgefüllten Hohlräume das Auspressen der Lösung. Im lösungsfreien Zustand ist wegen des kleineren Druckes in den Hohlräumen und somit der größeren Druckdifferenz zwischen diesen und dem umgebenden Salzgestein die Konvergenz-/Kompaktionsrate größer als im lösungsgefüllten Zustand und bewirkt eine schnellere Abnahme der Hohl-

raumvolumina. Im lösungsgefüllten Zustand bewirkt der höhere Lösungsdruck eine größere Stützfunktion, die zu einer Reduzierung der Konvergenz-/Kompaktionsrate führt.

Für die VSG wurden einige Erweiterungen im Programm MARNIE durchgeführt und verifiziert. Diese betreffen im Wesentlichen den Salzgrus-Kompaktionsansatz, die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung und die Freisetzungsmodelle für die Abfallbinde und deren Komponenten.

4.1.2 Das Programm TOUGH2

Der numerische Code TOUGH2 ist ein am Lawrence Berkeley Laboratory, USA, entwickeltes Programm zur Simulation des mehrdimensionalen gekoppelten Fluid-, Gas-, Nuklid- und Wärmetransports /PRU 99/.

In TOUGH2 werden die Massenerhaltungssätze für alle zu transportierenden Komponenten gekoppelt und implizit gelöst. Der Code beschreibt advective Prozesse für mehrphasige Systeme mit variabler Dichte anhand eines verallgemeinerten Darcy'schen Gesetzes. Durch die sogenannten EOS-Module (EOS: equation-of-state) werden die zur Verfügung stehenden Phasen, Komponenten und die thermodynamische Gleichgewichtsprozesse definiert. Salinare Wässer können mit dem EOS-Modul EOS7 beschrieben werden.

Mit dem EOS7R-Modul kann der Radionuklidtransport in der Gas- und Flüssigphase simuliert werden. Das EOS7R-Modul erweitert das EOS7-Modul um zwei Komponenten. Diese zwei Komponenten entsprechen einem so genannten Mutternuklid und einem Tochternuklid. Für beide Komponenten werden die initialen Massenanteile in der Flüssigphase vorgegeben.

Für die vorliegenden Analysen werden die gleichen Modifikationen des Berechnungsprogramms TOUGH2 mit dem EOS-Modul EOS7R verwendet (Details in /PRU 99/), die bereits für die Integritätsanalysen /KOC 12/ genutzt wurden.

Beschreibung des physikalischen Modells

In TOUGH2 wird der advective Transport verschiedener Phasen (i. d. R. Flüssigkeits- und Gasphase) berechnet. Die Phasen bestehen aus Komponenten, die entweder vom

advektiven Phasenstrom mitgetragen werden oder aber innerhalb einer Phase diffundieren. Komponenten können auch durch Prozesse wie Kondensation, Evaporation, Lösung oder Entgasung von der einen in die andere Phase wechseln. In TOUGH2 wird die Flüssigphase standardmäßig als reines Wasser simuliert. In der VSG wird von einer gesättigten Lauge ausgegangen. Im EOS7R-Modul kann die unterschiedliche Viskosität der Lauge zum reinen Wasser durch Korrekturfaktoren modelliert werden. Zu diesem Zweck werden die TOUGH2 Standardparameter zur Viskositätskorrektur verwendet (für NaCl-Lauge)².

Welche Phasen und Komponenten vorliegen und gemäß welchen thermodynamischen Prozessen sich die Komponenten auf die Phasen verteilen, hängt vom verwendeten EOS-Modul ab. Für die Berechnung des Radionuklidtransportes in der VSG wurde das EOS7R-Modul modifiziert. Im EOS7R-Modul werden die flüssige und gasförmige Phase mit den Komponenten Luft, Wasser und Lauge (hier wird in Anlehnung an TOUGH2 das Wort „Lauge“ für „brine“ benutzt) sowie ein Mutter- und ein Tochternuklid betrachtet.

In den Zustandsvariablen („Primärvariablen“) von TOUGH2 wird lediglich derjenige Teil der Radionuklide spezifiziert, der in der Flüssigkeit gelöst ist, und zwar in Form eines Massenanteils von der Masse der flüssigen Phase. Die Gesamtmenge an Radionukliden errechnet sich dann durch Anwendung des Henry Gesetzes unter Beibehaltung des spezifizierten Massenanteils in der Flüssigkeit.

In EOS7R wird die molekulare Diffusion der Komponenten in den jeweiligen Phasen mit Hilfe eines vereinfachten binären Diffusions-Modells berücksichtigt. Zudem kann in TOUGH2 durch einen Verteilungskoeffizienten die Adsorption der Radionuklide an die Festphase /OLD 95/ berechnet werden. Bei allen Rechnungen zur radiologischen Konsequenzenanalyse wird der Adsorptionsprozess vernachlässigt, da Adsorption an Steinsalz nicht stattfindet und Daten zur Adsorption an anderen Materialien, wie z. B. Sorelbeton der Streckenverschlüsse, nicht vorliegen. Die Radionuklide verhalten sich somit wie nicht-retardierende Tracer.

² Da für die MgCl₂-Lauge keine Korrekturfaktoren vorlagen, wurde mit den Korrekturfaktoren für NaCl-Lauge gerechnet. Der Fehler für den Laugenfluss liegt im Bereich der Bandbreite der vorhandenen Ungewissheiten, deshalb wird diese Annahme als vertretbar angesehen.

4.1.3 Qualifizierung der angewendeten Codes

Die Qualifizierungsstände der Programme MARNIE und TOUGH2 sind u. a. in /KOC 13/ beschrieben.

MARNIE /MAR 02/ wurde seit Ende der 1980-er Jahre entwickelt und seit dieser Zeit umfangreichen Tests unterzogen, die sich sowohl auf den Vergleich mit analytischen Lösungen, die Definition von komplexen Testfällen mit umfangreichen Überprüfungen bzw. Plausibilitätskontrollen als auch auf die Durchführung von Benchmark-Rechnungen mit ähnlichen Rechenprogrammen beziehen.

MARNIE /MAR 02/ wurde unter anderem in den EU-Projekten EVEREST /CAD 96/ und SPA /BAU 00/, /GOM 97/ sowie in Sicherheitsanalysen zum Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) eingesetzt. In den EVEREST- und SPA-Projekten wurden umfangreiche deterministische und probabilistische Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen zur Langzeitsicherheit für ein Endlager im Salinar durchgeführt. Im EVEREST-Projekt fanden außerdem zwischen GRS (Köln), NRG und GRS-Braunschweig Vergleichsrechnungen ausgewählter und abgestimmter Rechenfälle mit den Programmen MARNIE, der NRG-Version des Programmsystems EMOS und der EMOS-Version der GRS (Braunschweig) statt. Ferner wurden zur Verifikation von EMOS und MARNIE Testfälle definiert und die mit den beiden Programmen erzielten Ergebnisse verglichen. Mit MARNIE wurden außerdem Vergleichsrechnungen mit dem Programm SPRING /DEL 10/ durchgeführt, die gute Übereinstimmungen brachten.

Weiterhin kam MARNIE für Berechnungen im Rahmen der Beratertätigkeit der GRS für das Niedersächsische Umweltministerium zur Anwendung und wurde zu Vergleichsrechnungen mit den Programmen des Antragstellers herangezogen. Hier wurde ein Modell für das gesamte Grubengebäude des Bergwerks ASSE II einschließlich eines Teils des Deckgebirges erstellt. Es erfolgten eigene Berechnungen sowie Vergleichsrechnungen mit dem Programm TOUGH2. Außerdem wurden Rechnungen des Antragstellers mit dem Programmsystemen EMOS und KAFKA nachvollzogen. Auch hier ergab sich in allen Fällen eine gute Übereinstimmung.

Für die Berechnung des Kompaktionsverhaltens mit MARNIE und TOUGH2 wurden Vergleiche mit den im Projekt PAMINA /BUH 09/ erzielten Ergebnissen angestellt. Die Übereinstimmung war gut.

Der ursprüngliche TOUGH2-Code und die einzelnen EOS-Module sind zahlreichen Qualitätssicherungsmaßnahmen unterzogen worden, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Näheres zur Validierung und Verifikation von TOUGH2 und den EOS-Modulen findet sich in /PRU 99/ und besonders in den dort angegebenen Referenzen.

Im modifizierten Code TOUGH2 /NAV 13/ werden zusätzlich die Prozesse der Versatzkompaktion, der Korrosion, der Barrierendegradation und des Gasentweichens ins Gebirge betrachtet. Eine solche Prozessbetrachtung ist für das Verständnis der fluidodynamischen Vorgänge im Endlager dringend notwendig, jedoch lag zu Beginn der VSG kein Code mit entsprechender Eignung vor. Während der Laufzeit der VSG wurde aufbauend auf vorangegangenen Forschungsergebnissen /JAV 06b/, /JAV 06a/, /JAV 04/, /JAV 03/, /JAV 02/, /JAV 01/ eine für die genannten Zwecke geeignete Version des Codes TOUGH2 bis hin zur Anwendungsreife entwickelt. Die Anwendbarkeit (Verifikation) der im Code implementierten neuen Module begründet sich auf die folgenden internen Tests und Qualitätssicherungsmaßnahmen, die allerdings noch nicht vollständig abgeschlossen sind. Details zum Qualifizierungsstand (z. B. auch zu Benchmark-Tests) sind in /KOC 13/ zu finden:

- Vergleich der Rechenergebnisse mit analytischen Lösungen oder Ergebnissen anderer Rechencodes (Test einzelner Module)
- Kontrolle der Massenbilanzen und des Massenerhalts
- Plausibilitätskontrollen der Simulationsergebnisse im Rahmen der VSG-Arbeitspakete AP 9.1 und AP 10
- Analyse einfacher Systeme zum Test einzelner Module, Betrachtung komplexer Systeme (Endlagergeometrien und -entwicklungen) sowie Betrachtung extremer Annahmen und Entwicklungen
- Plausibilitätskontrollen im Code

4.2 Modellaufbau

Ein wesentliches Ziel beim Aufbau der Modelle war es für die Modellrechnungen mit MARNIE und TOUGH2 einen gemeinsamen Parametersatz zu nutzen, d. h. möglichst gleiche Rand- und Anfangsbedingungen zum Vergleich der Rechenergebnisse zu verwenden. Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweise der Rechenprogramme war

dies nicht immer möglich. Im Folgenden wird der Modellaufbau in seinen Gemeinsamkeiten und Unterschieden für MARNIE und TOUGH2 beschrieben.

4.2.1 Umsetzung des Grubenbaus auf der Einlagerungssohle

Allgemeine Grundlage beider Modelle ist das in /BOL 11/ erstellte und dann unter Berücksichtigung der geänderten Abfallmengen aktualisierte Endlagerkonzept der VSG /BOL 12/.

MARNIE bietet die Möglichkeit, ein Endlagerbergwerk in einzelne Module zu zerlegen und eine 1D-Netzwerkstruktur aufzubauen /MAR 02/. Diese 1D-Netzwerkstruktur erlaubt die Modellierung des Endlagerkonzepts in der Variante AB1 ohne vereinfachende Abstrahierungen bzgl. des Grubenbauplans. Das MARNIE-Grubenmodell mit dem Infrastrukturbereich, den Querschlägen mit den Streckenverschlüssen sowie den Schächten ist für den Ostflügel des Endlagerbergwerks in Abb. 4.1 dargestellt, der Westflügel in Abb. 4.2. Das gesamte MARNIE-Grubenmodell ist in Abb. A.2 zu sehen.

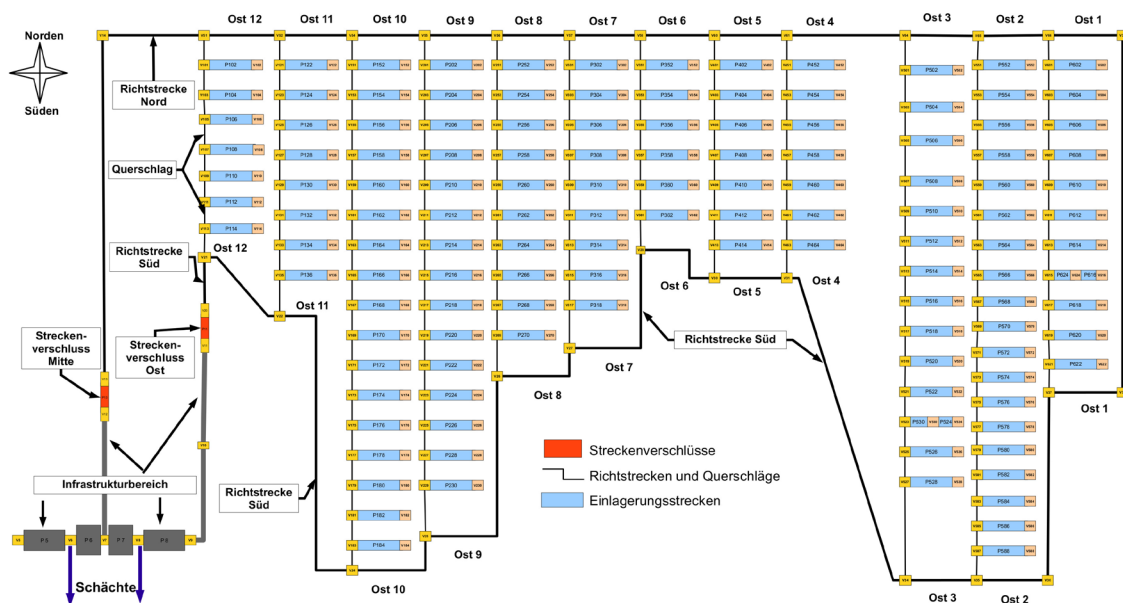


Abb. 4.1 Darstellung des Ostflügels mit dem Infrastrukturbereich auf der 870 m-Sohle im MARNIE-Grubenmodell

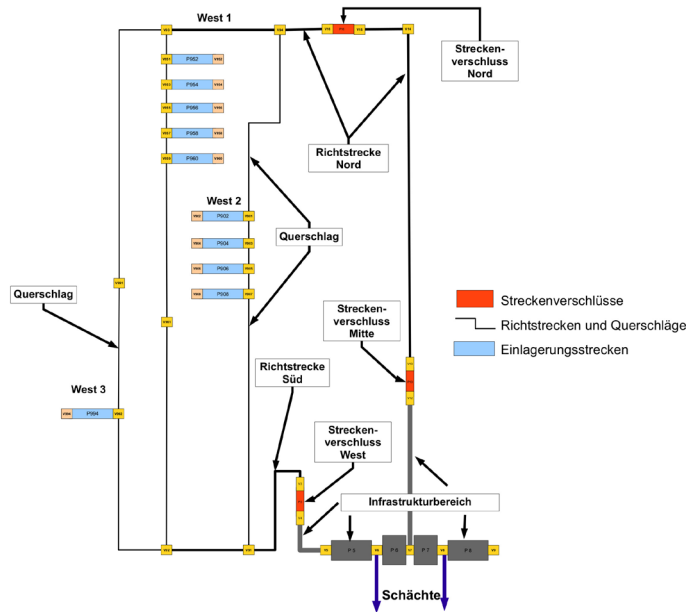


Abb. 4.2 Darstellung des Westflügels mit dem Infrastrukturbereich auf der 870 m-Sohle im MARNIE-Grubenmodell

Im Unterschied dazu sind für die Abbildung/Modellierung des Grubenbaus in TOUGH2 Vereinfachungen notwendig. Die TOUGH2-Berechnungen erfordern rechtwinklige Gitternetze, so dass das Grubengebäude mit einigen Vereinfachungen abgebildet werden musste. Wegen der Orthogonalität des Modellgitters entsprechen nicht alle Streckenlängen denen des Endlagerkonzeptes, sie sind allerdings in keinem Fall länger als im Endlagerkonzept, um bei Strömungs- und Transportrechnungen eine Verlängerung der Transportdistanzen auszuschließen. Bei der Gittererstellung wurde darauf geachtet, dass die Volumina der Hohlräume denjenigen des Endlagerkonzeptes entsprechen. Der Grund für die Wahl eines volumentreuen Gitters ist die Relevanz der Volumina für den Gasdruck und -transport sowie weitere damit in Zusammenhang stehende Prozesse. Um trotz dieser Vereinfachung Volumentreue zu erreichen, werden die Streckenquerschnitte entsprechend angepasst. Einen Überblick über das Modellgitter gibt Abb. 4.3. Insgesamt besteht das Gitter aus 1.742 Elementen und 6.908 Knoten.

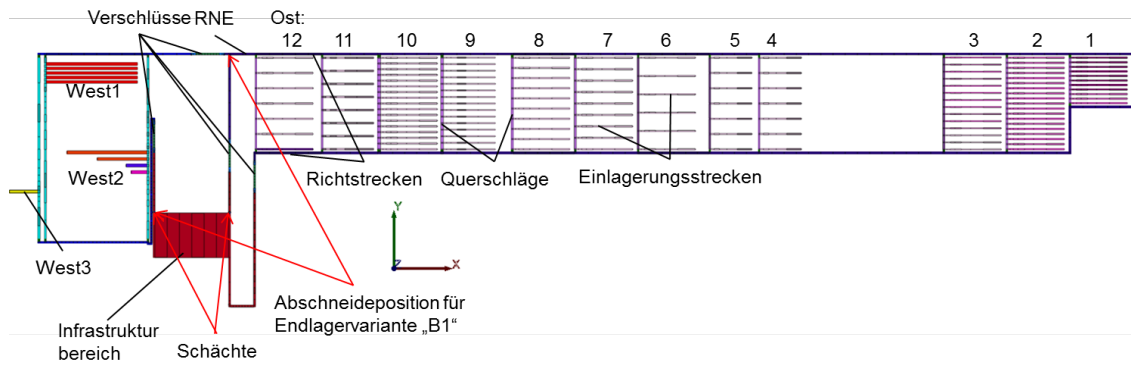


Abb. 4.3 Modellgitter des Grubenbaus für die Einlagerungsvarianten AB1 und B1 im TOUGH2-Grubenmodell

Farben kennzeichnen einzelne Materialgebiete (s. u.). Die roten Pfeile kennzeichnen die Punkte, an denen die Einlagerungsfelder des Westflügels zur Betrachtung des Konzepts „B1“ abgetrennt werden.

Die in MARNIE und TOUGH2 umgesetzten einzelnen Elemente des Endlagers besitzen je nach Material und Verwendung (Verschluss, Dammbauwerk, Richtstrecke, Einlagerungstrecke Querschlag usw.) unterschiedliche Eigenschaften, die in den jeweiligen Rechenprogrammen als Materialgrößen und Rand- bzw. Anfangsbedingungen spezifiziert sind. Eine Beschreibung dieser Materialien findet sich bereits in Kap. 3.2.3. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Eigenschaften der Materialien in den Berechnungsmodellen umgesetzt werden. Die wesentlichen Eigenschaften für die Berechnungen sind in Tab. 4.1 aufgeführt, alle weiteren Parameter sind in Anhang A.2 aufgelistet.

Der Salzgrusversatz wird in den Richtstrecken angefeuchtet (0,6 Gew.-%) und in den Querschlägen bzw. Einlagerungsstrecken gebirgstrocken (0,02 Gew.-%) eingebracht. Die Anfeuchtung der Richtstrecken erfolgt nach /MÜL 12b/ mit $MgCl_2$. Aufgrund seiner geringeren Viskosität wird dagegen im Hinblick auf den Transport im weiteren Vorgehen konservativ NaCl-Lösung unterstellt. Folglich werden in den Modellrechnungen die spezifischen Eigenschaften von NaCl-Lauge berücksichtigt, d. h., für die Dichte wird $1.200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ und für die Viskosität η_F der Lösung $1,5\cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ angenommen.

Die Kompaktion des Salzgrusversatzes wird über einen vereinfachten Ansatz modelliert, der in Kap. 4.2.3 detaillierter beschrieben wird. Dabei endet die Kompaktion, wenn die vorgegebene Restporosität erreicht ist. Die Entwicklung der Permeabilität des trockenen und angefeuchteten Salzgrusversatzes folgt während der Kompaktion der in

Kap. 3.3.2 beschriebenen Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung, insofern handelt es sich bei den in Tab. 4.1 aufgeführten Werten für diese Materialien um Werte vor Beginn der Kompaktion.

Die Widerlager werden in den Berechnungsmodellen nur mit sehr geringer Dichtwirkung (Permeabilität: $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$) jeweils an den Enden der Streckenverschlüsse berücksichtigt. Die Verschlussbauwerke selbst besitzen mit einer Porosität von 20 % eine integrale, d. h. die Auflockerungszone mitberücksichtigende, Permeabilität von $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Die Dichtpfropfen in den Querschlägen am Übergang zu den Richtstrecken werden in den Berechnungsmodellen der beiden Programme unterschiedlich parametrisiert. Vom Grundsatz her werden sie analog zu den Verschlussbauwerken hergestellt, gleichzeitig bestehen an die Dichtpfropfen aber keine Anforderungen bezüglich der Durchlässigkeit. Daher werden sie mit einer Porosität von 20 % und einer Permeabilität sowohl von $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ (analog Verschlussbauwerke, MARNIE) als auch von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ (analog Widerlager, TOUGH2) im Modell variiert. Variationsrechnungen um den Einfluss der Permeabilität der Dichtpfropfen zu quantifizieren, wurden mit beiden Berechnungsprogrammen durchgeführt.

In den Modellen wird angenommen, dass die Streckenverschlüsse während ihrer Funktionsdauer von 50.000 Jahren – gemäß ihrer Spezifikation / MÜL 12b/ – ihre Funktionstüchtigkeit behalten. Der tatsächliche Funktionsverlust nach diesem Zeitraum ist nicht quantifizierbar. Es wird vereinfacht angenommen, dass sich nach dieser Zeit ihre Permeabilität um drei Größenordnungen (also um den Faktor 1.000) erhöht.

Die Infrastrukturbereiche der Einlagerungssohle (870 m) und der Erkundungssohle (840 m) werden mit Schotter aufgefüllt. Das resultierende Speichervolumen unter Berücksichtigung einer Porosität von 38 % beträgt auf der Einlagerungssohle insgesamt ca. 87.400 m^3 . Auf der Erkundungssohle sind 110.000 m^3 aufgefahrene Strecke vorhanden, was einem Hohlraumvolumen von 41.800 m^3 entspricht. Zusätzlich werden 12.000 m^3 Bischofit eingebracht. Die daraus resultierende weitere Reduktion des Porenvolumens wird dem Infrastrukturbereich auf der Erkundungssohle (840 m) zugeordnet. Somit reduziert sich das Speichervolumen auf 29.800 m^3 . Um dieses Speichervolumen zu erreichen wird der Infrastrukturbereich der 840 m-Sohle mit einer Porosität von 27 % und einer Permeabilität von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ modelliert.

Für alle betrachteten Rechenfälle, die dem Referenzszenarium zugerechnet werden, wird angenommen, dass der Infrastrukturbereich der 870 m-Sohle initial 5.100 m^3

NaCl-Lösung enthält. Für das Alternativszenarium *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* (weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP) verdoppelt sich nach /BEU 12/ das Volumen der NaCl-Lösung auf 10.200 m³.

Tab. 4.1 Hydraulische Modellparameter für verschiedene Bereiche des Endlagers

Bereich im Grubenbau	Material	(Anfangs-) Porosität [%]	Kompaktierbar/ PPB*** anwendbar	(Anfangs-) Permeabilität MARNIE [m ²]	(Anfangs-) Permeabilität TOUGH2 [m ²]
Einlagerungsstrecke	Salzgrusversatz, trocken	35	ja	1,3·10 ⁻¹¹	1,3·10 ⁻¹¹
Querschläge an Einlagerungsstrecken	Salzgrusversatz, trocken	35	ja	1,3·10 ⁻¹¹	1,3·10 ⁻¹¹
Richtstrecken	Salzgrusversatz, angefeuchtet	35	ja	1,3·10 ⁻¹¹	1,3·10 ⁻¹¹
Dichtpfropfen	Sorelbeton A1	20	nein	5·10 ⁻¹⁷ **	1·10 ⁻¹⁵ *
Streckenverschlüsse	Sorelbeton A1	20	nein	5·10 ⁻¹⁷	5·10 ⁻¹⁷
Widerlager an Streckenverschlüssen	Sorelbeton A1	20	nein	1·10 ⁻¹⁵	1·10 ⁻¹⁵
Infrastrukturbereich der Einlagerungssohle	Schotter mit Bischofit	38	nein	1·10 ⁻⁰⁹	1·10 ⁻⁰⁸

* In Variationsrechnungen wurde eine Permeabilität von 5·10⁻¹⁷ genutzt

** In Variationsrechnungen wurde eine Permeabilität von 1·10⁻¹⁵ angesetzt

*** Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung

Die Volumina der Endlagerbehälter wurden im Ostflügel aus den Volumina der Einlagerungsstrecken herausgerechnet, da davon ausgegangen wird, dass die Endlagerbehälter dem Gebirgsdruck standhalten und nicht durchströmt werden. Im Westflügel sind die Volumina der Einlagerungsstrecken unverändert, da hier Konrad Container IV und VI sowie Gussbehälter Typ II und Betonbehälter Typ I verwendet werden. Es wird davon ausgegangen, dass diese dem Gebirgsdruck nicht standhalten können. Um den Restporenraum der Einlagerungsbehälter zu berücksichtigen, wird für den Salzgrus-

versatz der Einlagerungsstrecken, in denen Behälter enthalten sind, die Porosität, bis zu der eine Kompaktion möglich ist, auf 25 % gesetzt. In Variationsrechnungen mit MARNIE und TOUGH2 wird ein entsprechender Ansatz für die südliche Strecke im Einlagerungsfeld Ost 12 angewendet, in welcher die Brennelementstrukturteile eingelagert werden sollen.

4.2.2 Umsetzung der Schächte und der Erkundungssohle

Die beiden Schächte werden in den Berechnungsmodellen anhand der Schachtauslegung der DBE TECHNOLOGY /MÜL 12b/ mit hohem Detaillierungsgrad nachgebildet. Die für die hydraulischen Berechnungen wichtigsten Parameter – Permeabilität und Porosität – sind für die einzelnen Elemente des Schachtverschlusses in Tab. 4.2 dargestellt. Alle weiteren Parameter sind in Anhang A.3 aufgeführt.

Tab. 4.2 Hydraulische Parameter der Schachtfunktionselemente in den Modellen von MARNIE und TOUGH2 auf Basis der Auslegungswerte /MÜL 12a/ in Tab. 3.2

Nr.	Funktion	Material	Porosität [%]	Permeabilität MARNIE [m ²]	Permeabilität TOUGH2 [m ²]
1	Stützring	Schotter	30	1·10 ⁻¹²	1·10 ⁻¹¹
2	Filter / Aufsättigung	Kies	30	1·10 ⁻¹²	1·10 ⁻¹¹
3	1. Dichtelement	Bentonit	30	1·10 ⁻¹⁷	7,8·10 ⁻¹⁸
4	Filter	Kies	30	1·10 ⁻¹²	1·10 ⁻¹¹
5	Gebirgsverbundenes Widerlager dräniert	Salzbeton	10 MARNIE 23 TOUGH2	1·10 ⁻⁰⁹	1·10 ⁻⁰⁹
6	Widerlager / Speicher	Schotter	23	1·10 ⁻⁰⁹	1·10 ⁻⁰⁹
7	Langzeitdichtung	Feuchter Salzgrus	10	3·10 ^{-14*}	1·10 ⁻¹⁴ PPB**
8	Opferschicht / fiktives Widerlager	Salzbeton	10	2·10 ⁻¹⁵	integral:
9	2. Dichtelement	Salzbeton	10	7·10 ⁻¹⁹	1,30·10 ⁻

Nr.	Funktion	Material	Porosität [%]	Permeabilität MARNIE [m ²]	Permeabilität TOUGH2 [m ²]
10	fiktives Widerlager	Salzbeton	10	2·10 ⁻¹⁵	
11	Widerlager / Speicher	Schotter	38	1·10 ⁻⁰⁹	1·10 ⁻⁰⁹
12	3. Dichtelement	Sorelbe- ton	20	5·10 ⁻¹⁷	5·10 ⁻¹⁷
13	Widerlager/Speicher	Sorelbe- ton	20 TOUGH2	1·10 ⁻⁰⁹	1·10 ⁻¹⁵

* keine Kompaktion, aber Permeabilitätsverringern auf 7·10⁻¹⁹ in 400 Jahren wie für Salzgrus Kategorie „feucht-kalt“ (siehe folgende Absätze)

** Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung

*** Berechnung siehe Anhang A.2.2

Wie in /MÜL 12b/ beschrieben, bezieht sich der Stand der Planung der Schachtverschlussfunktionselemente auf den Schacht 1. Wegen des unterschiedlichen Verlaufs der Gorlebenbank im Schacht 2 müssen die Dichtelemente der dort vorliegenden Geologie angepasst werden. Eine Detailplanung für Schacht 2 wurde im Rahmen der VSG nicht durchgeführt. Sein Funktionsaufbau wird deshalb im Modell analog zu Schacht 1 betrachtet.

Der Schachtverschluss bzw. die einzelnen Elemente des Schachtverschlusses behalten während ihrer Funktionsdauer von 50.000 Jahren ihre Spezifikation der Auslegung /MÜL 12b/. Da auch in diesem Fall der tatsächliche Funktionsverlust hinsichtlich der Barrierewirksamkeit nach 50.000 Jahren nicht quantifizierbar ist, werden auch hier vereinfachte Annahmen getroffen. Es wird angenommen, dass sich nach dieser Zeit die Permeabilität der Funktionselemente jeweils um drei Größenordnungen erhöht. Das heißt, dass die Elemente auch nach dem Funktionsverlust jeweils eine unterschiedliche Permeabilität aufweisen. Auch für die sog. Langzeitdichtung aus Salzgrusversatz wird ein Funktionsverlust unterstellt.

Das bedeutet für das TOUGH2-Berechnungsmodell, dass die Permeabilität dieser Langzeitdichtung selbst nach dem Funktionsverlust um drei Größenordnungen vergleichsweise gering ist: Die Langzeitdichtung hat nach Abschluss der Kompaktion eine Porosität von 1 % und eine Permeabilität von ca. 3·10⁻²⁰ m² und somit nach dem Funktionsverlust eine Permeabilität von 3·10⁻¹⁷ m².

Für das MARNIE-Berechnungsmodell wird aus programmtechnischen Gründen die Langzeitdichtung im Schacht vereinfacht modelliert. Sie kompaktiert nicht und behält folglich die Porosität von 10 % bei. Die Erhöhung des Widerstands durch die Kompaktion wird durch die Verringerung der Permeabilität (Anfangswert: $3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ nach der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung) analog zu der Änderung der Porosität nach dem Kompaktionsverhalten für feucht/kalte Bereiche (Kap. 3.3.1) simuliert. Nach 400 Jahren wird nach diesem Ansatz eine Permeabilität von $7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ erreicht, was der Permeabilität des Salzbetons entspricht. Dieser Permeabilitätswert wird während der Funktionsdauer der Dichtelemente des Schachtes von 50.000 Jahren beibehalten. Anschließend wird die Permeabilität der Langzeitdichtung wie die der anderen Dichtelemente im Schacht um ca. drei Größenordnungen auf ca. $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ erhöht. Damit wird das Schachtverschlussversagen nach Ende der Funktionsdauer in beiden Programmen geringfügig unterschiedlich behandelt.

Der Infrastrukturbereich der Erkundungssohle wird in den Modellen über eine durchlässige Schottersäule (Nr. 11 in Tab. 4.2) an den Schacht angeschlossen und ergibt unter Berücksichtigung einer Schotterverfüllung (38 % Porenraum) und der Auffüllung mit technischem Bischofit ein Resthohlraumvolumen von 29.800 m^3 ($(110.000 \text{ m}^3 \cdot 0,38) - 12.000 \text{ m}^3$ Bischofit), welches als mögliches Speichervolumen für Fluide dient. Die Schächte enden im Modell auf der 870 m-Sohle und sind an den Infrastrukturbereich sowie an die zugehörigen Querschläge angeschlossen.

Das gesamte Speichervolumen eines Schachtes für zutretende Fluide beträgt ca. 5.800 m^3 . In den Rechnungen wird die Lösungssättigung des Bentonits mit 45 %, des Salzbetons mit 85 % und des Sorelbetons mit 80 % als Anfangsbedingung berücksichtigt /MÜL 12c/. Das Gesamt-Speichervolumen der Schächte und der beiden Infrastrukturbereiche beträgt insgesamt ca. 128.000 m^3 .

In allen Berechnungen wird eine Druckrandbedingung von 4,6 MPa an der Oberkante beider Schächte in 340 m Teufe direkt nach der Fertigstellung des Schachtverschlusses berücksichtigt. Diese ergibt sich aus dem anstehenden hydrostatischen Druck und einer zusätzlichen Wassersäule von ca. 50 m durch den Anstieg des Meeresspiegels (entsprechend der prognostizierten Klimaentwicklung in /BEU 12/). Die Fertigstellung des Schachtverschlusses wird für die MARNIE-Rechnungen mit 55 Jahren nach Beginn der Einlagerung angesetzt.

4.2.3 Umsetzung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz

Das in Kap. 3.3.1 beschriebene Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes wird in MARNIE und TOUGH2 wie folgt berechnet: Für die Kompaktionsrate K gilt /RÜB 10/:

$$K = K_{ref} \cdot f_{loc} \cdot f_t \cdot f_p \cdot f_\phi \cdot f_T \quad (4.1)$$

Die Größe K_{ref} wird als Referenz-Kompaktionsrate bezeichnet. Sie gibt die stationäre Kompaktionsrate eines unversetzten Grubenbaus ohne Fluid unter Referenzverhältnissen und auf einem Referenzniveau z_{ref} wieder, welche sich im Grenzfall $t \rightarrow \infty$ einstellt. Die Referenzkonvergenzrate für Gorleben wird mit $0,01 \text{ a}^{-1}$ /BUH 91/ für die nachfolgende Approximation angenommen.

Die weiteren Faktoren beschreiben die folgenden Abhängigkeiten:

- f_{loc} = lokale Eigenschaften des umgebenden Salzgesteins,
- f_t = die „explizite“ Zeitabhängigkeit des Kompaktionsprozesses,
- f_p = Stützwirkung durch den Fluiddruck p von Flüssigkeiten oder Gasen,
- f_ϕ = Stützwirkung von trockenem oder feuchtem Versatz mit einer Porosität ϕ
- f_T = Beschleunigung der Kompaktion bei erhöhter Temperatur T durch wärmeproduzierende Abfälle.

Die Berechnung der einzelnen Faktoren ist in Anhang A.3 angegeben.

Für die Modellierung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus wird ein vereinfachter Modellansatz angewendet, der die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Kompaktion durch die Approximation an die aus den Code_Bright-Berechnungen /CZA 12/ resultierenden Porositäts-Zeitverläufen simuliert (Abb. 3.8). Für die bereits in Kap. 3.3.1 beschriebenen fünf Kategorien für den Versatz werden Zeitpunkte identifiziert, zu denen Code_Bright für die Kriechklasse 5 eine Porosität von 5 % berechnet hat (s. Abb. 3.8). Der Zeitpunkt des Erreichens von 5 % Porosität wird als Referenzzeitpunkt für die Approximation der Kurvenverläufe gewählt, da die zeitliche Entwicklung der Porosität bis 5 % nahezu lineares Verhalten zeigt, wohingegen die Kurvenverläufe für Porositäten kleiner 5 % (s. Abb. 3.8) eine starke nicht lineare Zeitabhängigkeit bis zum Erreichen der Restporosität aufweisen.

Zur Variation der Kriechklassen werden die Zeitpunkte des Erreichens der Porosität von 5 % in den Modellrechnungen variiert. So werden einerseits in Anlehnung an die Rechnungen mit Code_Bright auf Basis der Kriechklasse 5 kurze Zeiträume zum Erreichen einer Porosität von 5 % gewählt, andererseits aber auch längere Zeiträume, um die Bandbreite der möglichen Entwicklung der Salzgruskompaktion (z. B. bei veränderten Kriechklassen) abzudecken. Diese Zeiträume werden im Folgenden als „schnelle“ bzw. „langsame“ Kompaktion bezeichnet. Damit ergeben sich für die oben beschriebenen Kategorien für den Versatz die in Tab. 4.3 aufgeführten Zeitpunkte zum Erreichen der Porosität von 5 %.

Tab. 4.3 Zeitpunkte des Erreichens von 5 % Porosität für die unterschiedlichen Kategorien aus Abb. 4.5

Bezeichnung	schnelle Kompaktion t' [a]	langsame Kompaktion t' [a]
trocken, heiß	10	50
trocken, warm	80	200
trocken, kalt	800	1000
feucht, warm	50	100
feucht, kalt	80	200

Die Kompaktionsraten werden nach Gleichung (4.1) über Parameteranpassungen so eingestellt, dass die Porosität von 5 % im Grubengebäude bei Atmosphärendruck in den unterschiedlichen Kategorien zu den vorgegebenen Zeitpunkten (s. Tab. 4.3) erreicht wird. Dies geschieht durch die Anpassung des Faktors f_{loc} . Die Parameter zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit und der expliziten Zeitabhängigkeit der Kompaktionsrate werden so gesetzt, dass die entsprechenden Faktoren f_T und f_t den Wert 1 annehmen. Der Einfluss eines abweichenden Fluidinnendrucks f_p und der Stützwirkung des Versatzes f_ϕ wird weiterhin im Modellansatz berücksichtigt. Die Berechnung des Faktors f_ϕ ist abhängig vom Feuchtegehalt des Salzgrusversatzes. Die in Tab. 4.3 angegebenen Zeiten zum Erreichen von 5 % Porosität müssen daher durch unterschiedliche Werte für den Faktor f_{loc} für trockenen und feuchten Salzgrus unter Atmosphärendruck approximiert werden. Die Ansätze und die entsprechenden Werte für f_{loc} werden in Kap. A.3 beschrieben.

In Abb. 4.4 sind die nach Gleichung (4.1) mit den entsprechenden Werten für den Faktor f_{loc} (s. Tab. A.10) berechneten Porositäts-Zeitverläufe für die unterschiedlichen Kategorien („trocken/heiß“, „trocken/warm“, „trocken/kalt“, „feucht/warm“ und „feucht/kalt“) im Vergleich zu den Rechenergebnissen von Code_Bright für die „schnelle“ bzw. „langsame“ Kompaktion dargestellt.

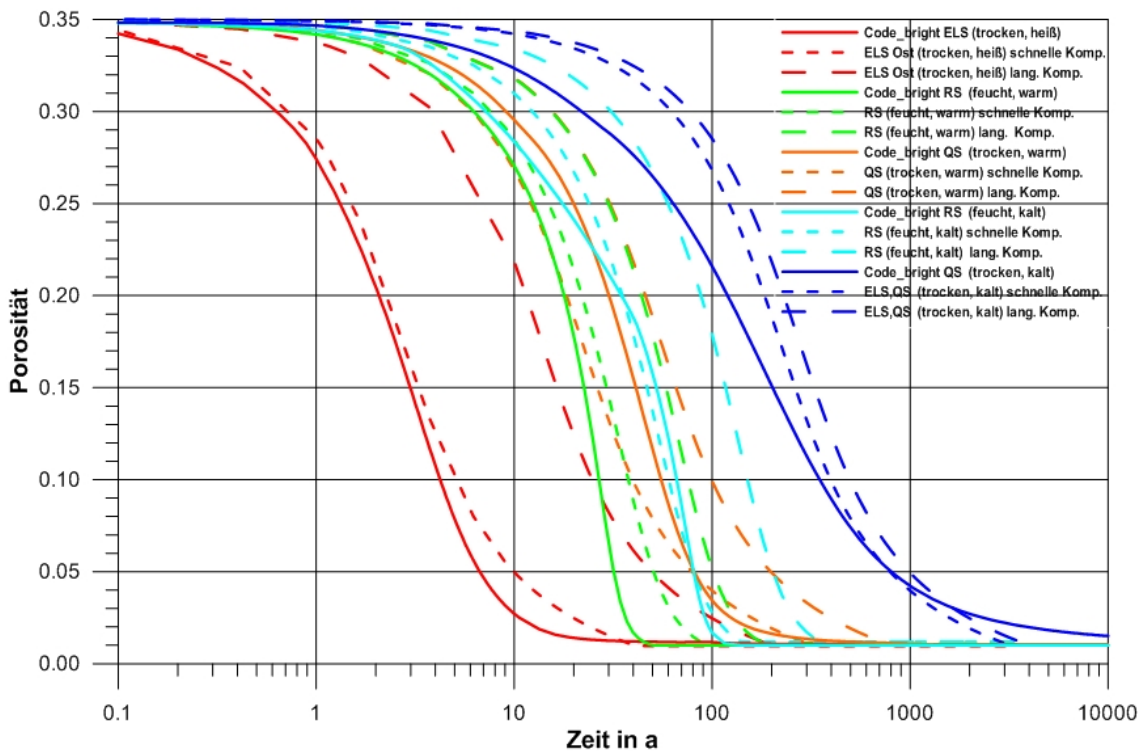


Abb. 4.4 Vergleich der Porositätsentwicklung

Porositätsverläufe für die verschiedenen Kategorien nach den Berechnungen mit Code_Bright (durchgezogene Linien) und den Anpassungen in den Modellen der radiologischen Konsequenzenanalyse für den Kompaktionsansatz (gestrichelte Linien) für die „schnelle“ bzw. „langsame“ Kompaktion. Die für die Approximation gewählten Zeitpunkte zum Erreichen von 5 % Porosität sind in Tab. 4.3 angegeben.

Alle mit Salzgrus versetzten Strecken im Grubenbau werden – im Nachgang zu den Temperaturfeldrechnungen in /LER 11b/ und der Definition der Auslegungsmerkmale „trocken“ oder „angefeuchtet“ – zur Berechnung der Kompaktion einer der fünf Kategorien zugeordnet. Abb. 4.5 zeigt die Zuordnung der Strecken zu den einzelnen Kategorien für das gesamte Endlagermodell /BOL 12/. Die überwiegende Anzahl der Einlagerungsstrecken im Ostflügel gehören der Kategorie „trocken/heiß“ an, wobei hier in einigen Einlagerungsstrecken aufgrund der Einlagerung weniger bzw. nicht Wärme entwickelnder Abfälle auch die Kategorie „trocken/warm“ bzw. „trocken/kalt“ angesetzt werden musste (südliche Strecke von Einlagerungsfeld Ost 12 sowie Einlagerungsfeld

Ost 1 und zum Teil Ost 2 – 4). Für die Querschläge im Ostflügel wird bis auf wenige Ausnahmen, die der Kategorie „trocken/kalt“ (Einlagerungsfeld Ost 1 und Ost 2) zugeordnet werden, die Kategorie „trocken/warm“ angenommen. Die Richtstrecken im Ostflügel gehören im Allgemeinen der Kategorie „feucht/warm“ an, auch hier gibt es jedoch einige „feucht/kalte“ Bereiche. Im Westflügel und im Infrastrukturbereich erfolgt keine Temperatureinwirkung, deshalb wird für Einlagerungsstrecken und Querschläge die Kategorie „trocken/kalt“ und für die Richtstrecken „feucht/kalt“ gewählt.

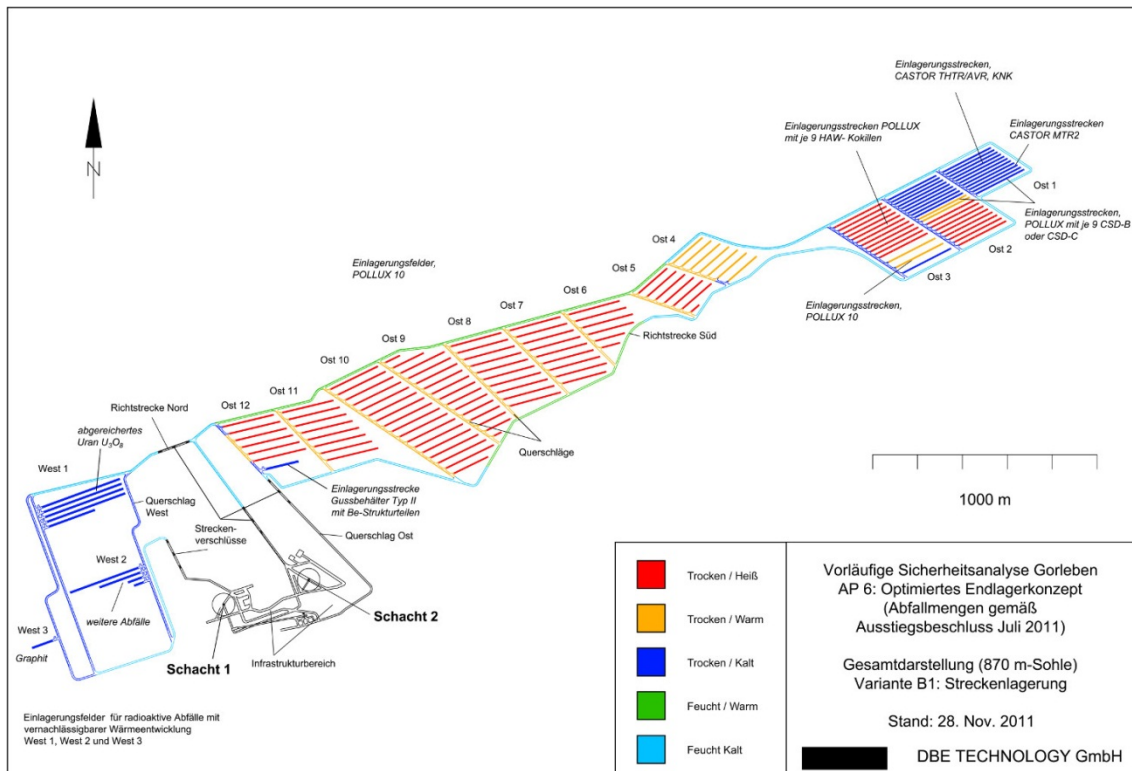


Abb. 4.5 Einteilung der Strecken im Endlager auf Basis der Temperaturfeldrechnungen /LER 11a/ und dem Feuchtegrad des Salzgrusversatzes zur Approximation der Salzgrusversatzkompaktion

4.2.4 Zeitliche Abfolge der Einlagerung

Als Anfangszeitpunkt der numerischen Berechnung des Verhaltens des Endlagersystems kann einerseits der Zeitpunkt direkt nach Fertigstellung des Schachtverschlusses (Beginn der Szenarienentwicklung) festgelegt werden. Dieser Zeitpunkt wurde für die Berechnungen mit TOUGH2 verwendet. Andererseits können die numerischen Berechnungen die Betriebszeit während der Einlagerung der Abfälle und des Verschlusses des Endlagers berücksichtigen, wie es z. B. für die Temperatureinwirkungsberechnungen

nungen in /LER 11b/ geschehen ist. Im Gegensatz zu TOUGH2 beginnen die numerischen Berechnungen in MARNIE mit der Einlagerung der ersten Abfälle. Damit kann die Kompaktion in den Einlagerungsbereichen der zeitlichen Einlagerung entsprechend behandelt und mit zunehmender Beladung der Einlagerungsfelder die verstärkt einsetzende Kompaktion des Salzgrusversatzes durch die wärmeentwickelnden Abfälle berücksichtigt werden. Außerdem wird durch die dadurch mögliche Berücksichtigung des Einlagerungsregimes auch der fortschreitende Zerfall der eingelagerten Radionuklide in den Behältern berechnet. Die zwischenzeitlich vorliegenden Ergebnisse mit THOUGH2 in /KOC 12/ zeigen, dass vermutlich realistischere Ergebnisse bzgl. der Gasdruckentwicklung und des Gastransports zu erwarten sind, wenn man den Einlagerungsfahrplan berücksichtigt. Der Grund ist, dass ein Großteil des im Porenraum vorhandenen Gasvolumens schon während der Einlagerungsphase ausgepresst wird, da die Kompaktion in den östlichsten Einlagerungsfeldern schon während der Betriebsphase beginnt. Dieser Effekt muss bei der Interpretation der vorliegenden TOUGH2-Berechnungen berücksichtigt werden. Ein entsprechender Bedarf, TOUGH2 diesbezüglich weiterzuentwickeln, wird im Abschlussbericht der Integritätsanalysen /KOC 12/ und Anhang A.8 formuliert.

Für die Berechnungen mit MARNIE wird die zeitliche Abfolge der Einlagerung der Abfälle im Ostflügel (Einlagerungsfahrplan) für die Variante B1 mit dem geplanten Einlagerungsbeginn zum 1. Januar 2035 nach /LER 11b/ berücksichtigt (s. Tab. 4.4). Der Einlagerungsverlauf für den Westflügel der Einlagerungsvariante AB1 ist im Detail unbekannt, wird aber als parallel zum Ostflügel angenommen. Der Einlagerungsbeginn für das Feld West 3 wird daher mit 5 Jahren, Feld West 1 mit 17,5 Jahren und Feld West 2 mit 32,5 Jahren nach dem Beginn der Betriebsphase am 01.01.2035 angesetzt.

Tab. 4.4 Zeitliche Belegung der Einlagerungsfelder in der Variante B1 – Ausstieg im Jahr 2022 /LER 11b/

Einlagerungsfeld	Typ des Endlagerbehälters	Einlagerungszeitpunkt des 1. Behälters	Einlagerungszeitpunkt des letzten Behälters
Ost 1	CASTOR® (THTR, AVR, KNK, MTR2), POLLUX®-CSD-B/C	01.01.2035	04.12.2041
Ost 2			
Ost 2.1 - 2.11	POLLUX®-CSD-B/C	08.12.2041	12.04.2046
Ost 2.12 a	POLLUX®-CSD-B/C	17.04.2046	29.04.2046
Ost 2.12 b	POLLUX®-9	03.05.2046	12.07.2046
Ost 2.13 - 2.19	POLLUX®-9	16.07.2046	11.03.2048
Ost 3			
Ost 3.1 - 3.11	POLLUX®-9	15.03.2048	21.10.2050
Ost 3.12 a	POLLUX®-9	25.10.2050	08.01.2051
Ost 3.12 b	POLLUX®-10-WWER	12.01.2051	16.01.2051
Ost 3.13 – 3.14	POLLUX®-10-WWER	20.01.2051	04.09.2051
Ost 4	POLLUX®-10-WWER	08.09.2051	05.04.2053
Ost 5			
Ost 5.1 a	POLLUX®-10-WWER	09.04.2053	21.04.2053
Ost 5.1 b	POLLUX®-10	25.04.2053	26.06.2053
Ost 5.2 – 5.7	POLLUX®-10	30.06.2053	03.09.2054
Ost 6	POLLUX®-10	07.09.2054	14.03.2056
Ost 7	POLLUX®-10	18.03.2056	03.01.2059
Ost 8	POLLUX®-10	07.01.2059	05.03.2062
Ost 9	POLLUX®-10	09.03.2062	10.04.2065
Ost 10	POLLUX®-10	14.04.2065	26.07.2070
Ost 11	POLLUX®-10	30.07.2070	06.02.2073
Ost 12	POLLUX®-10	10.02.2073	01.01.2075

4.2.5 Modellvorstellung zur Freisetzung des volatilen Anteils der Instant Release Fraction (IRF)

Der volatile Anteil der Instant Release Fraction (IRF) ist aufgrund der Modellierungsrandbedingungen für Rechnungen zum Gaspfad (instantane Beladung und Verschließung, instantane Freisetzung von Radionukliden in gasförmigen Verbindungen aus initial defekten Behältern sowie aus der Einlagerungsstrecke für Strukturteile) für die Quelltermmittlung gasförmig freigesetzter Radionuklide von besonderer Bedeutung. In der ungestörten Entwicklung eines Endlagersystems im Salz wird erwartet, dass nur die abfallnah angetroffene Feuchtigkeit (in Behältern, natürlicher Gehalt des anstehenden Gebirges bzw. in den Salzgrus versetzten Strecken) in der Lage ist über Korrosion und Gasbildung Radionuklide in einer volatilen Form über die IRF freizusetzen. Zur Festlegung der jeweiligen IRF-Anteile der Radionuklide für die Langzeitsicherheitsanalyse spielt dabei auch die Prozesshistorie der Brennelemente von der Herstellung über die Einlagerung der Brennstäbe in POLLUX[®]-10-Behältern in der Betriebsphase bis zum Verschluss des Endlagers eine im Detail schwer quantifizierbare Rolle. So können die in Kap. 3.2.2 und Kap. 3.3.4 beschriebenen Wechselwirkungen der Feuchtigkeit mit den Brennelementen (nach /DÖR 12/ ca. 60 g POLLUX[®]-10) bereits mit der Einbringung in die CASTOR[®]-Behälter beginnen. Die vorherrschenden hohen Temperaturen in den Behältern während der Temperaturphase begünstigen die in /SMI 93/ beschriebene Diffusion des C-14 aus der Oxidschicht und dem Hüllrohr. Unter den reduzierenden Bedingungen ist eine C-14-Freisetzung durch Methanbildung mit dem derzeitigen Kenntnisstand unwahrscheinlich, kann aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Da eine Methanbildung aus oxidischen Kohlenstoffverbindungen jedoch kinetisch stark behindert ist, wird diese nur für carbidischen Kohlenstoff im metallischen Zirkonium der Hüllrohre unterstellt. Diese C-14-Methanfreisetzung geht unter Voraussetzung eines ausreichenden Lösungsangebots einher mit der Korrosion der Brennstabhülsen und kann über die Korrosionsrate der Hülle beschrieben werden. Während einer Umkonditionierung der Brennelemente aus CASTOR[®]-Behältern, d. h. Verpackung der Brennstäbe und Strukturteile in die dafür vorgesehenen Endlagerbehälter POLLUX[®]-10 und Gusscontainer, können die während der Zwischenlagerzeit gebildeten Gase freigesetzt werden. Im gegebenen Fall wäre damit ein Teil der IRF bereits entwichen.

Für die verschiedenen Abfallarten liegen nach Kap. 3.2.2 unterschiedliche Fraktionen der Instant Release Fraction (**IRF**) vor, die in den Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit z. B. mit den Programmen TOUGH2 und MARNIE zu berücksichtigen sind.

Um die Auswirkungen der IRF auf die Radionuklidfreisetzung und die radiologische Konsequenz aufzeigen zu können, sind Modellvorstellungen für die IRF erforderlich. Es werden für das Referenzszenarium /BEU 12/ folgende Annahmen Modellvorstellungen festgelegt:

- Die POLLUX[®]-Behälter sind für mindestens 500 Jahre gasdicht ausgelegt. Somit wird von einer IRF für die POLLUX[®]-Behälter frühestens ab diesem Zeitpunkt ausgegangen.
- Bei der Einlagerung ist nach /BEU 12/ anzunehmen, dass bis zu vier POLLUX[®]-10-Behälter mit Fertigungsfehlern eingelagert werden. In den Berechnungen zur radiologischen Konsequenzenanalyse wird vereinfacht angenommen, dass diese vier Behälter mit Start der Berechnung als vollständig defekt vorliegen. Diese Behälter werden im Folgenden als „initial defekt“ bezeichnet.
- Zu Beginn der Einlagerung sind keine externen Lösungen in den Einlagerungsstrecken anzutreffen.
- Die in die Behälter eingelagerten Brennstäbe enthalten einen Rest an Feuchtigkeit /DÖR 12/.
- Die Kontrolle bei der Umverpackung der Brennstäbe /DÖR 12/ von den CASTOR[®]-Behältern in die POLLUX[®]-10 Behälter stellt sicher, dass die Brennstäbe nicht beschädigt sind. Ob bis zu diesem Zeitpunkt schon gebildetes Gas freigesetzt wird, ist bei der Umverpackung zu prüfen.
- Das für die Prozessabläufe zur Verfügung stehende Wasser wird initial mit der Feuchtigkeit in den Behältern eingebracht.

Für das radioaktive Kohlenstoffisotop C-14 werden folgende Freisetzungen der IRF in die Lösungs- und Gasphase nach Verschluss des Endlagers angenommen:

- a) Instantan aus den initial defekten POLLUX[®]-10-Behältern
- b) Instantan aus Strukturteilen (Hüllrohre und Strukturteile der Brennelemente)
- c) Nach 500 Jahren instantan aus den POLLUX[®]-10-Behältern und den POLLUX[®]-9-Behältern mit CSD-C Abfällen.

Für die Radionuklidfreisetzung über den Gaspfad stehen ohne Korrosion der Brennstabhüllrohre (die abfallnah eingebrachten Lösungen reichen für eine weitergehende Korrosion nicht aus) in den initial defekten POLLUX[®]-10 Behältern nur die Radionuklide aus der Oxidschicht der Brennstabhüllrohre als IRF_{Hülle} zur Verfügung (s. Abb. 3.4). Durch die Säurebehandlung bei der Wiederaufbereitung ist in den CSD-C-Abfällen

keine Oxidschicht vorhanden. Somit muss hier eine $IRF_{H\ddot{u}lle}$ nicht berücksichtigt werden. Für die initial defekten POLLUX[®]-10 Behälter bedeutet dies in diesem Zusammenhang, dass zwar die POLLUX[®]-Behälter nicht mehr gasdicht sind, aber die Brennstabhülsen sich im ursprünglichen Zustand befinden und aufgrund der geringen Restfeuchte im Behälter nicht durchgängig korrodieren. Daher reagieren nur die Anteile der IRF mit der Restfeuchtigkeit, die sich an der Außenseite der Brennstabhülle befinden oder durch Diffusion aus der Oxidschicht der Hülle heraustreten können ($IRF_{H\ddot{u}lle}$). Die IRF, die sowohl in der Brennstoffmatrix als auch im Zwischenraum von Brennstabmatrix und Hüllrohre anzunehmen sind (IRF_{Matrix}), reagieren nicht und bleiben bis zum Defekt der Brennstabhülsen vor Ort. Dagegen können durch Diffusion oder Lösung aus der Oxidschicht Radionuklide der $IRF_{H\ddot{u}lle}$ (i. e. S. das Nuklid C-14) mit Beginn der Einlagerung in den Restporenraum des POLLUX[®]-10-Behälter freigesetzt werden. Für die volatile Radionuklidfreisetzung des C-14 wird basierend auf /SMI 93/ eine $IRF_{H\ddot{u}lle}$ von 10 % des Inventars der Hüllrohre als Kohlendioxid ($^{14}CO_2$) in der Gasphase angenommen (Tab. 3.1), da eine Reduktion zu Methan ($^{14}CH_4$) kinetisch stark gehemmt ist. In den Behältern der Strukturteile wird eine $IRF_{Struktur}$ der akkumulierten Radionuklide C-14, Cl-36, Ni-59 und Ni-63 aus den Oxidschichten von 20 % (Tab. 3.1) der Aktivität angenommen /JOH 04/, da die Oberflächen der Strukturteile allseitig zugänglich sind. Das in der Oxidschicht vorhandene C-14 liegt als oxidische Kohlenstoffverbindung, d. h. als Karbonat, vor. Die Reduktion zu Methan ist auch hier kinetisch gehemmt.

Nach 500 Jahren werden auch ohne Korrosion alle POLLUX[®]-10 und POLLUX[®]-9-Behälter mit Wiederaufarbeitungsrückständen als defekt angenommen, da dann keine weiteren Anforderungen (z. B. gegen mechanische Belastungen) an sie gestellt sind. Zu diesem Zeitpunkt wird nach der vorliegenden Modellvorstellung aus den POLLUX[®]-10-Behältern sowohl das auf der Oberfläche der Hüllrohre sorbierte bzw. aus der Oxidschicht diffundierte C-14 ($IRF_{H\ddot{u}lle}$) als auch die Radionuklide der IRF_{Matrix} , die sich in der Brennstoffmatrix auf den Korngrenzen bzw. Spaltraum befinden, freigesetzt, weil zu diesem Zeitpunkt auch die Brennstäbe als defekt angesehen werden. Es wird unterstellt, dass das freigesetzte C-14 als gasförmiges Kohlendioxid vorliegt.

Die Verteilung und Speziation des C-14 auf bzw. in Oxidschicht, Zircaloymetall und Brennstoffmatrix ist weitgehend unbekannt und Gegenstand von F&E-Studien, z. B. Untersuchungen in /EU 12/. Oxidation- und Reduktionsprozesse an Kohlendioxid und Methan sind kinetisch stark gehemmt und werden für die Bedingungen im Behälter nicht erwartet. Oxidische Kohlenstoffverbindungen werden bevorzugt Kohlendioxid als

Gasphase bilden. Carbidische Kohlenstoffverbindungen werden bevorzugt Methan als Gasphase bilden. Elementarer Kohlenstoff ist als inert anzusehen.

Neben der gasförmigen Freisetzung der IRF kann die Freisetzung in Lösungen erfolgen. Diese Freisetzung ist sowohl abhängig von einem Lösungszutritt als auch von den Abfällen und den darin enthaltenen Radionukliden. Zur Entwicklung einer Modellvorstellung zum Quellterm wird angenommen, dass Lösung in die Einlagerungsstrecke gelangt und die POLLUX®-10-Behälter sowie die Zirkaloyhülsen der Brennstäbe korrodieren. Somit sind bei Laugenkontakt und Korrosion die Radionuklide der IRF aus dem Zwischenraum und der Brennstoffmatrix (s. Abb. 3.3) zu berücksichtigen. Diese werden für die IRF_{Matrix} (Kornoberflächen bzw. Klüfte der Brennstoffpellets und Zwischenraum) von /KIE 12/ angegeben (Tab. 3.1). Nach der Modellvorstellung der gleichzeitigen Freisetzung der IRF aus Hüllrohr ($IRF_{Hülle}$) und Brennstoffmatrix (IRF_{Matrix}) bezieht sich hier die 10 % IRF auf das jeweilige Inventar der in der IRF vorhandenen Radionuklide der Brennstäbe (IRF_{Stab}).

Tab. 4.6 Radionuklidspezifische Inventare der IRF der Brennstoffmatrix (IRF_{Matrix}) und der Hüllrohre ($IRF_{Hülle}$) pro POLLUX®-10-Behälter

Nuklid	BE-Matrix [Bq]	IRF BE-Matrix ¹		Hüllrohr [Bq]	IRF Hüllrohr ²	
		[Bq]	[g]		[Bq]	[g]
C-14	$1,094 \cdot 10^{+11}$	$1,094 \cdot 10^{+10}$	$6,633 \cdot 10^{-02}$	$7,859 \cdot 10^{10}$	$7,859 \cdot 10^{09}$	$4,763 \cdot 10^{-02}$
Cl-36	$2,595 \cdot 10^{+09}$	$2,595 \cdot 10^{+08}$	$2,117 \cdot 10^{-01}$	$2,759 \cdot 10^{09}$	$2,759 \cdot 10^{08}$	$2,251 \cdot 10^{-01}$
Ni-59				$1,051 \cdot 10^{12}$	$1,051 \cdot 10^{11}$	$3,514 \cdot 10^{01}$
Ni-63				$1,112 \cdot 10^{14}$	$1,112 \cdot 10^{13}$	$5,292 \cdot 10^{+00}$
Sr-90	$7,337 \cdot 10^{+15}$	$7,337 \cdot 10^{+13}$	$1,429 \cdot 10^{+01}$			
Tc-99	$4,256 \cdot 10^{+12}$	$4,256 \cdot 10^{+09}$	$6,685 \cdot 10^{+00}$			
Pd-107	$4,358 \cdot 10^{+10}$	$4,358 \cdot 10^{+07}$	$2,290 \cdot 10^{+00}$			
I-129	$9,060 \cdot 10^{+09}$	$1,812 \cdot 10^{+08}$	$2,773 \cdot 10^{+01}$			
Cs-135	$1,492 \cdot 10^{+11}$	$2,983 \cdot 10^{+09}$	$6,085 \cdot 10^{+01}$			
Cs-137	$1,209 \cdot 10^{+16}$	$2,418 \cdot 10^{+14}$	$7,551 \cdot 10^{+01}$			

¹ Die IRF_{Matrix} der Brennstoffmatrix wird mit einem Abbrand von $48 \text{ GWd} \cdot \text{tSM}^{-1}$ nach /KIE 12/ angenommen (s. Tab. 3.1).

² Als $IRF_{Hülle}$ der Hüllrohre wird nach /SMI 93/ 10 % angenommen (s. auch Tab. 3.1).

Da die Strukturteile einer zutretenden Lauge eine größere Oberfläche als die intakten Brennstäbe anbieten, werden für die in der Oxidschicht akkumulierten Radionuklide C-14, Cl-36, Ni-59 und Ni-63 eine IRF_{Struktur} von 20 % der jeweiligen Inventare der in der IRF vorhandenen Radionuklide der Strukturteile angenommen /JOH 04/ (Tab. 3.1). Der im Zirkaloymetall der Brennstabhüllrohre und Brennstoffmatrix vorliegende carbidi-sche Kohlenstoff wird kongruent mit dem Korrosionsfortschritt als Methan freigesetzt.

Tab. 4.6 und Tab. 4.7 beinhalten die radionuklidspezifischen Inventare der IRF der Brennstoffmatrix (IRF_{Matrix}) bzw. der Hüllrohre ($IRF_{\text{Hülle}}$) und der Strukturteile pro POLLUX®-10-Behälter, die die Basis der Berechnung des Gas- und Lösungspfads bilden.

Tab. 4.7 Inventar der IRF der Strukturteile für eine Einlagerungsstrecke mit 2620 Gussbehältern Typ II

Nuklid	Strukturteile		IRF Strukturteile*		
	Inventar pro Guss Typ II [Bq]	Inventar Gesamt [g]	Inventar pro Guss Typ II [Bq]	Inventar pro Guss Typ II [g]	Inventar in der Strecke [g]
C-14	$2,147 \cdot 10^{+09}$	$3,409 \cdot 10^{+01}$	$4,294 \cdot 10^{+08}$	$2,602 \cdot 10^{-03}$	6,81
Cl-36	$7,989 \cdot 10^{+07}$	$1,708 \cdot 10^{+02}$	$1,598 \cdot 10^{+07}$	$1,304 \cdot 10^{-02}$	0,34
Ni-59	$1,391 \cdot 10^{+11}$	$1,219 \cdot 10^{+05}$	$2,783 \cdot 10^{+10}$	$9,303 \cdot 10^{+00}$	24373
Ni-63	$1,310 \cdot 10^{+13}$	$1,634 \cdot 10^{+04}$	$2,621 \cdot 10^{+12}$	$1,247 \cdot 10^{+00}$	3267
Sr-90	$1,272 \cdot 10^{+08}$	$6,488 \cdot 10^{-02}$			
Tc-99	$7,842 \cdot 10^{+07}$	$3,227 \cdot 10^{+02}$			
Pd-107	$1,830 \cdot 10^{+03}$	$2,520 \cdot 10^{-01}$			
J-129	$3,441 \cdot 10^{+02}$	$1,379 \cdot 10^{-01}$			
Cs-135	$7,319 \cdot 10^{+03}$	$3,911 \cdot 10^{-01}$			
Cs-137	$3,170 \cdot 10^{+08}$	$2,593 \cdot 10^{-01}$			

* Als IRF_{Struktur} für die Strukturteile wird nach /JOH 04/ 20 % angenommen (s. auch Tab. 3.1).

Eine weitere vom Prozess bereits beschriebene Modellvorstellung der C-14-Freisetzung, die nach derzeitigem Kenntnisstand als nicht wahrscheinlich einzustufen ist, kann wie folgt beschrieben werden: Die auf der Oberfläche der Hüllrohre sorbierten und aus der Oxidschicht stammenden oxidischen Verbindungen mit C-14 könnten unter reduzierenden Verhältnissen vollständig zu Methan ($^{14}\text{CH}_4$) weiter reagieren. Diese liegen dann in der Folge auch vollständig in der Gasphase vor. Nach gegenwärtiger

Einschätzung ist diese Reduktion zu Methan jedoch unter Zwischen- und Endlagerbedingungen kinetisch stark gehemmt und im Rahmen von F&E zu untersuchen.

4.3 Modellierung mit dem Programm MARNIE und betrachtete Rechenfälle

Die Modellrechnungen werden bis $1 \cdot 10^6$ Jahre durchgeführt. Für einige Rechenfälle mit Parametervariationen oder auch in einigen Rechnungen zur Robustheit des Systems wird der Simulationszeitraum verlängert. Im Folgenden werden die MARNIE-spezifischen Modell-Annahmen und Randbedingungen näher erläutert sowie die betrachteten Rechenfälle beschrieben.

4.3.1 Spezifische Annahmen und Randbedingungen für die MARNIE-Rechnungen

Der Simulationszeitraum für die MARNIE-Rechnungen beginnt mit der Einlagerung der ersten Behälter in den Feldern Ost 1 bzw. West 3 und berücksichtigt damit die sukzessive Einlagerung und den Verschluss bzw. Versatz der Einlagerungsfelder. Die genaue Abfolge der Einlagerung wird in Kap. 4.2.4 beschrieben. Berücksichtigung finden somit die schon während der Einlagerung beginnende Kompaktion des Salzgrusversatzes und der Zerfall der Radionuklide in den bereits eingelagerten Behältern.

Die Berechnung der Kompaktion des Salzgrusversatzes in den einzelnen Einlagerungsfeldern beginnt, nachdem diese nach dem Einlagerungsfahrplan komplett beladen und ebenso wie die angrenzenden Richtstrecken versetzt wurden. Der radioaktive Zerfall der eingelagerten Radionuklide in den Behältern der einzelnen Einlagerungsfelder wird ab einem mittleren Zeitpunkt, der aus dem Beginn und dem Ende der Einlagerung in diesem Feld ermittelt wird, berechnet.

Für die Berechnung der Kompaktion wird die Temperaturentwicklung in der in Kap. 4.2.3 beschriebenen Form berücksichtigt. Die Berechnung weiterer Lösungsgrößen im Endlager, wie z. B. die Dichte des Fluids, der Fluiddruck und die Mobilisierung aus verglasten Abfällen, erfolgt auf Basis dieser Entwicklung. Für jede Strecke im Endlager wird eine in den Temperaturfeldrechnungen ermittelte Temperaturentwicklung an ausgewählten Stützstellen, die für die jeweilige Strecke als repräsentativ angesehen werden können, vorgegeben.

Die Dichte der Lösung wird in MARNIE, ausgehend von der Referenzdichte für NaCl-Lösung, abhängig von der Temperatur und dem Druck berechnet, wobei eine Kompressibilität von $4,5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ angenommen wird.

Für alle versetzten Hohlräume wird für den Versatz eine Restporosität von $1 \pm 1 \%$ angenommen /POP 12/. Im Referenzszenarium und in den Alternativszenarien werden folglich Restporositäten von 1% und als Variante der Parameterungewissheit 2% betrachtet. Die Permeabilität des Salzgrusversatzes wird anhand der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung aus der Porosität berechnet /WIE 12/. Ist die Restporosität von 1% erreicht, liegen nach /POP 12/ keine zusammenhängenden Porenräume mehr vor, so dass advektiver Transport nicht mehr möglich ist. Aus programmtechnischen Gründen wird bei Erreichen der Restporosität von 1% mit einer Permeabilität von $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ (unverritztes Steinsalz /POP 12/) gerechnet. Bei Porositäten $> 1 \%$ wird immer der Wert aus der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung verwendet. Bei einer Restporosität von 2% errechnet sich ein Wert von $7,3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.

Da MARNIE für den Lösungstransport konzipiert wurde und nur einphasig rechnet, erfolgt die Berücksichtigung der Gasgenerierung und die Wechselwirkung auf den Lösungstransport durch den entsprechenden zusätzlichen Gasdruckaufbau in den MARNIE-Rechnungen nur eingeschränkt. Die Gasbildung und der Gastransport in Wechselwirkung mit dem Lösungstransport (Zweiphasenfluss) werden in den TOUGH2-Rechnungen ausführlich behandelt. Hinsichtlich der Ermittlung der radiologischen Konsequenzen in der Langzeitsicherheitsanalyse ist die Anwendung beider Rechenprogramme somit abdeckend für beide Transportpfade.

In Bezug auf den sich durch die fortschreitende Kompaktion und der eingeschlossenen Luftmenge entwickelnden Gasdruck wird in den Rechnungen mit MARNIE ein konservatives Vorgehen gewählt. Die Kompaktion des Salzgrusversatzes setzt bereits in der Betriebsphase des Endlagers nach dem Verfüllen jeder einzelnen Strecke ein und ist folglich in vielen Bereichen, insbesondere dort, wo die wärmeentwickelnden Abfälle eingelagert werden, schon zu einem großen Teil vorangeschritten, bevor die in Richtung Infrastrukturbereich liegenden Richtstrecken und auch der Infrastrukturbereich selbst versetzt werden. Ein Großteil der im Endlager vorhandenen Luftmenge kann daher während der Betriebsphase entweichen, bevor der Schachtverschluss fertiggestellt ist. Da jedoch nicht zu quantifizieren ist, zu welchem Anteil die Luft während der Betriebsphase entweichen kann, wurde für die Berechnung der Kompaktion in MARNIE konservativ angenommen, dass die gesamte enthaltene Luft vollständig ein-

geschlossen bleibt und als Gegendruck der Kompaktion entgegen wirkt. Beim Zustrom von Lösung in die Strecken wird der aus der eingeschlossenen Luftmenge resultierende Gasdruck konservativ nicht berücksichtigt, da dieser den Zustrom verlangsamen würde. Es wird deshalb so lange Atmosphärendruck angenommen, bis diese Strecken vollständig gefüllt sind.

Im Westflügel sind die entstehenden Gasmengen, z. B. durch die größeren initialen Wassermengen und der damit verbundenen Stahlkorrosion, weitaus größer als im Ostflügel, so dass Transportvorgänge zweiphasig betrachtet werden müssen. Die damit zu erwartenden Gastransportprozesse stehen in Wechselwirkungen mit dem Ostflügel. Die Analysen rein lösungstragender Transportvorgänge im Westflügel mit MARNIE sind, aufgrund fehlender Möglichkeiten im Code die Gasentwicklung und den Gasdruck adäquat zu ermitteln, als nicht belastbar im Hinblick auf das Transportgeschehen einzuschätzen. Deshalb werden die MARNIE-Rechnungen, in denen möglicherweise Freisetzungen von Radionukliden aus dem Ostflügel zu erwarten sind, überwiegend mit der Variante B1 ohne Modellierung des Westflügels durchgeführt.

In den Transportrechnungen werden die für den Zeitpunkt der Einlagerung ermittelten Inventare (Kap. 4.3.2) der verwendeten Radionuklide (Kap. 4.3.2.5) berücksichtigt, wenn die Ergebnisse der hydrodynamischen Rechnungen eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager als möglich prognostizieren. Für diese Radionuklide wurden die in Kap. 4.3.2.6 beschriebenen Löslichkeitsgrenzen berücksichtigt und zur Berechnung des RGI (Kap. 2.1) die im Anhang A.7.1 aufgeführten Dosiskonversionsfaktoren herangezogen.

Die Freisetzung der Radionuklide aus den Behältern in die Lösungsphase wird nach dem für die Einlagerungsstrecke bzw. dem Abschnitt einer Einlagerungsstrecke gültigen Mobilisierungsmodell (s. Kap. 4.3.2.4) berechnet, nachdem die jeweilige Strecke vollständig mit Lösung gefüllt ist. Zur Berechnung der Mobilisierung von Radionukliden, wie z. B. bei der IRF der Hüllrohre und der Brennstabmatrix, steht in MARNIE ein Mobilisierungsmodell zur Verfügung. Dieses erfordert die Zuordnung des radionuklidspezifischen Inventars im Behälter auf die einzelnen Bereiche (Kap. 4.3.2.4). Tab. A.14 enthält die Anteile der betrachteten Radionuklide für die Brennstäbe. In Tab. 3.1 sind die Anteile der Radionuklide, die in der IRF der Brennstoffmatrix, der Hüllrohre und der Strukturteile anzunehmen sind, aufgelistet.

Als obere Grenze für die nachfolgenden Rechnungen zu den Referenz- und Alternativszenarien auf Basis der Beschreibung in Kap 3.3.2 wird unter Berücksichtigung der Tortuosität ein Diffusionskoeffizient von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ verwendet. Für die MARNIE-Rechnungen wurde eine Dispersionslänge in den mit Salzgrus versetzten Bereichen von 0,05 m /WIE 12/ angenommen.

4.3.2 Quellterm der Radionuklidmobilisierung

4.3.2.1 Radionuklidinventar zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle

Grundlage für die Zusammenstellung des radioaktiven Inventars, das in den MARNIE-Rechnungen ab dem Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle berücksichtigt wird, ist /PEI 11a/, der das auf Basis des Ausstiegs aus der Kernenergie im Jahr 2022 zu erwartende Mengengerüst mit der entsprechenden Abfallspezifikation enthält /SEH 13/. Zur Berücksichtigung der Entwicklung des radioaktiven Abfallinventars vor der Einlagerung muss der Zerfall der Radionuklide über die Zeit (Abklingzeit) vom Ausladen aus dem Reaktorkern bis zur Einlagerung betrachtet werden. /PEI 11a/ gibt Inventare für verschiedene Abklingzeit-Altersklassen an. Als Beispiel ist in Abb. 4.6 dargestellt, wie die Abklingzeit des radionuklidspezifischen Aktivitätsinventars der wärmeentwickelnden Abfälle für die Abfallkokillen mit Brennelementstrukturteilen aus der Wiederaufbereitung (CSD-C-Abfälle) für den Zeitpunkt der Einlagerung im Jahr 2040 ermittelt wird. Grundlage hierfür sind die in Tab. A.12 (Anhang A.5) angegebenen Abklingzeit-Altersklassen aus /PEI 11a/ zusammen mit der zeitlichen Abfolge der Einlagerung in den Einlagerungsfeldern (Einlagerungsfahrplan) für die Variante B1 (Tab. 4.4, /LER 11b/) bei dem geplanten Einlagerungsbeginn am 01.01.2035.

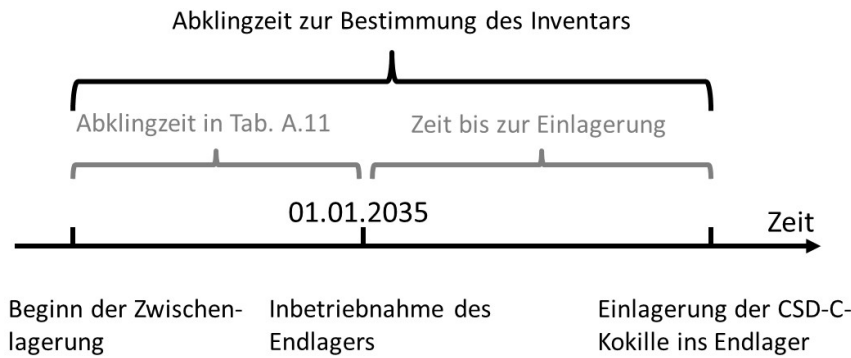


Abb. 4.6 Schematische Darstellung der Berechnung der Abklingzeit zur Bestimmung des Radionuklidinventars zum Zeitpunkt der Einlagerung am Beispiel einer CSD-C Kokille

Werden die Zwischenlagerungszeiträume (Abklingzeiten) für die Brennelemente in den POLLUX[®]-10-Behältern ebenfalls wie nach dem für die CSD-C-Kokillen in Abb. 4.6 dargestellten Verfahren berechnet, gehören zum Zeitpunkt der Einlagerung alle Brennelemente in den POLLUX[®]-10-Behältern zur Abklingzeit-Altersklasse von 45 – 50 Jahren oder älter. Unter Verwendung der Abklingzeit-Altersklassen aus /PEI 11a/ und des in /LER 11b/ angegebenen Einlagerungsplans werden zum Zeitpunkt der Einlagerung alle Brennstäbe in den Behältern mindestens 49 Jahre zwischengelagert (unter der Annahme, dass die ältesten Brennstäbe zuerst und die jüngsten zuletzt eingelagert werden). Die jüngsten bzw. ältesten Brennstäbe werden im Jahr 2035 den Abklingzeit-Altersklassen von 10 – 14 Jahren bzw. 40 – 44 Jahre zugeordnet. Die ältesten Brennstäbe haben bei der Einlagerung der ersten POLLUX[®]-10-Behälter in der Einlagerungsstrecke Ost 3.12 im Jahre 2051 eine Abklingzeit-Altersklasse von ca. 55 – 60 Jahren (40 + 16), die jüngsten haben bei der Einlagerung des letzten POLLUX[®]-10-Behälters in der Einlagerungsstrecke Ost 12.6 im Jahre 2073 eine Abklingzeit-Altersklasse von 45 – 50 Jahren (10 + 38). Da ein genauere Belegungsplan der Abfallgebinde heute naturgemäß noch nicht existieren kann, wird für die Brennstäbe der DWR-, SWR- und WWER-Reaktoren eine Zwischenlagerungszeit (Abklingzeit) von 45 Jahren angenommen (s. a. Kap. 4.3.2.4). Die Abklingzeit zur Berechnung des Inventars zum Zeitpunkt der Einlagerung der Brennstäbe der Forschungsreaktoren, der CSD-B- und CSD-V-Kokillen sowie der AVR- und THTR-Brennelementkugeln) errechnet sich analog zum Beispiel der CSD-C-Abfälle. Grundlage ist der Belegungsplan in die Einlagerungsfelder (/BOL 11/ und /BOL 12/), der strecken- und behältergenau in das verwendete MARNIE-Modell übertragen wird (s. Tab. A.13).

4.3.2.2 **Hydraulische Randbedingungen der Mobilisierung**

Wie bereits im Kap. 4.2.5 beschrieben, ist die zur Verfügung stehende Wassermenge der limitierende Faktor auch für die Freisetzung der Radionuklide aus den Abfällen (Mobilisierung). In den Modellrechnungen mit dem Programm MARNIE wird der Prozess der Stahlkorrosion bei der Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen nicht explizit betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die POLLUX®-10-Behälter nach 500 Jahren defekt sind und die zutretende Lösung direkt sowohl für die Mobilisierung der Radionuklide aus den Hüllrohren als auch aus der Brennstoffmatrix zur Verfügung steht. Dabei wird der zeitliche Ablauf der Korrosionsprozesse, d. h. Korrosion der Behälter, Korrosion der Hüllrohre und Auflösung der Brennstoffmatrix, nicht weiter betrachtet.

Dieser Ansatz kann auch bei vollständiger Lösungssättigung als äußerst konservativ angesehen werden, da die vorhandene geringe speicherbare Menge an Lösung (die Porosität in den Einlagerungsstrecken entspricht der Restporosität) in drei Prozessen gleichzeitig verwendet wird. In einer mit Lösung gefüllten Einlagerungsstrecke mit 28 POLLUX®-10-Behältern liegt bei einer Restporosität von 2 % ein Lösungsvolumen von ca. 57.000 kg Wasser vor. Allein für die vollständige anaerobe Korrosion der 55.500 kg Stahl eines POLLUX®-10-Behälters /DÖR 12/ werden nach /FRI 12/ ca. 23.857 kg Wasser benötigt. Für die Stahlkorrosion stehen für jeden Behälter aber nur ca. 2.040 kg Wasser zur Verfügung. Dies entspricht etwa 8 % der für eine vollständige Korrosion erforderlichen Wassermenge. Gleichzeitig wird angenommen, dass diese zur Verfügung stehende Lösung sowohl für die Stahlkorrosion der Behälter und Hüllrohre, für die Matrixauflösung als auch für den Transport der freigesetzten Radionuklide verwendet werden kann. Die Annahme, dass für alle drei Prozesse ein und dieselbe begrenzte Wassermenge verwendet wird, führt zu einer großen Konservativität in den Annahmen für die Mobilisierung. Bei den löslichkeitsbegrenzten Nukliden wie z. B. U-238, das in großer Menge in den Abfällen vorliegt, wird dies noch in gewissem Maße über die Löslichkeitsgrenze reguliert, bei den nicht löslichkeitsbegrenzten Nukliden jedoch wie z. B. Ni-59, Nb-94 oder Cl-36 wird die Freisetzung massiv überschätzt.

Für die nachfolgenden geochemischen Randbedingungen der Mobilisierung von Radionukliden in der Lösungsphase (Quellterm) geht die Modellvorstellung von einem unbegrenzten Wasserangebot (Sättigung) in den Einlagerungsstrecken aus.

4.3.2.3 Geochemische Randbedingungen der Mobilisierung

Die geochemischen Randbedingungen der Mobilisierung aus den Abfällen sind in Tab. 4.5 für den Ostflügel und in Tab. 4.6 für den Westflügel angegeben. Die Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfallarten (Quellterme) ist in /KIE 13/, /KIE 12/ beschrieben. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die in den MARNIE-Rechnungen verwendeten Parameterdaten für die Mobilisierung unter Anwesenheit einer ausreichenden Lösungsmenge.

Tab. 4.5 Geochemische Randbedingungen für wärmeproduzierende Abfälle in NaCl bzw. MgCl₂ dominierten Systemen

	NaCl System	MgCl ₂ System
Referenzlösung	5,6 mol/ L NaCl	> 4,0 mol/ L MgCl ₂
Carbonatkonzentration	Szenarienabhängig [CO ₃ ²⁻] = 0 Referenz	Szenarienabhängig [CO ₃ ²⁻] = 0 Referenz
pH _m	6 < pH _m < 9	6 < pH _m < 9
Redoxbedingungen	reduzierend	reduzierend

Tab. 4.6 Geochemische Randbedingungen für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in NaCl-, MgCl₂ bzw. CaCl₂-dominierten Systemen

	NaCl System	MgCl ₂ System	CaCl ₂ System
Referenzlösung	5,6 mol/L NaCl	4,0 mol/L MgCl ₂	2,0 mol/L CaCl ₂
Carbonatkonzentration	Calcit-Sättigung: 3,6·10 ⁻⁶ mol/L	Calcit-Sättigung: 1,9·10 ⁻⁴ mol/L	Calcit-Sättigung: 3,0·10 ⁻⁶ mol/L
Sulfatkonzentration	Gips-Sättigung: 4,8·10 ⁻² mol/L	Gips-Sättigung: 1,6·10 ⁻² mol/L	Gips-Sättigung: 2,5·10 ⁻³ mol/L
pH _m	pH _m = 12,8	pH _m = 8,7	pH _m = 12,0
Redoxbedingungen	reduzierend	reduzierend	reduzierend

4.3.2.4 Inventar und Freisetungsverhalten der Abfälle

CASTOR® AVR/THTR

Die AVR-Brennelementkugeln in den CASTOR®-Behältern werden nach dem 01.01.2035 in die Einlagerungsstrecken Ost 1.1 bis 1.3 b eingelagert (s. Tab. 4.4 und Tab. A.13). Anschließend folgt die Einlagerung der THTR-Brennelementkugeln in die

Einlagerungsstrecken Ost 1.3 a bis 1.8 a. Die Freisetzungsrates für AVR/THTR Abfälle kann nach /KIE 13/ mit einer Rate von $2 \cdot 10^{-9} \text{ d}^{-1}$ abgeschätzt werden.

CASTOR® KNK und Brennstäbe der Otto Hahn

Für die vier KNK-Castoren mit 2.484 Brennstäben des KNK II und 52 Brennstäben der NS Otto Hahn, die in das Einlagerungsfeld Ost 1.8 d (Tab. A.13) eingelagert werden, ist eine nuklidspezifische Gesamtaktivität für das Jahr 2038 (Annahme: 01.01.2038) angegeben /PEI 11a/. Bei den Abfällen des KNK II (Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage) und der NS Otto Hahn handelt es sich um nicht wiederaufgearbeitete Brennstäbe. Die Brennstäbe der NS Otto Hahn sind prinzipiell wie ein DWR-Brennstab aufgebaut, besitzen jedoch einen größeren Anteil leicht mobilisierbaren Inventars ($\text{IRF}_{\text{Matrix}}$, s. Tab. 4.7). In den Rechnungen wird angenommen, dass die IRF der NS Otto Hahn auch bei den KNK II-Brennstäben gültig ist. Alle weiteren Eingabewerte werden von den DWR-Brennelementen (Tab. 4.9) übernommen.

Tab. 4.7 $\text{IRF}_{\text{Matrix}}$ der Brennstäbe der NS Otto Hahn /KIE 13/

Komponente	IRF
fission gas	16 %
^{14}C	10 %
^{36}Cl	28 %
^{90}Sr	9 %
^{99}Tc , ^{107}Pd	9 %
^{129}I , ^{135}Cs , ^{137}Cs	16 %

CASTOR® MTR 2 (BER II und FRM II)

Die BER II und FRM II Abfälle werden in die Felder Ost 1.8 b und c bzw. 1.9 a eingelagert. Die Aluminiummatrix der BER II und FRM II Abfälle korrodiert vollständig innerhalb von 20 Tagen bei Kontakt mit MgCl_2 -reichen Lösungen /KIE 13/. Unter der Annahme, dass mit der Korrosion der Aluminiummatrix die darin enthaltenen Radionuklide ebenfalls freigesetzt werden, wird für die BER II und FRM II Abfälle eine Freisetzung innerhalb eines Jahres modelliert.

POLLUX®-9: CSD-B

Ein POLLUX®-9-Behälter ist dafür ausgelegt, 9 CSD Kokillen aufzunehmen /BOL 11/. Die 308 CSD-B Kokillen (Tab. A.12) können somit in 35 POLLUX®-9-Behälter im Feld Ost 1.10 eingelagert werden. Die Abfälle der CSD-B Kokillen sind wie in den CSD-V Kokillen in einer Glasmatrix fixiert. Daher kann das Modell der Freisetzung, wie es für die Glasmatrix der CSD-V verwendet wird, übernommen werden (Tab. 4.8).

POLLUX®-9: CSD-C

Für die C-14-Freisetzung aus den CSD-C Abfällen der Einlagerungsstrecken 1.9b, 1.11 und 2.1 – 2.12a wird in /KIE 12/ eine Freisetzungsrate aus dem Zirkaloy mit $2,9 \cdot 10^{-5} - 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ angegeben. Da keine Angaben für Freisetzungsraten anderer Radionuklide vorliegen, wird für alle betrachteten Radionuklide die Freisetzungsrate von C-14 verwendet. Eine Oxidschicht ist für die CSD-C-Abfälle nicht vorhanden, da sie in der Wiederaufbereitung mit Säure behandelt wurden, weshalb eine IRF aus der Oxidschicht nicht betrachtet wird. In den Rechnungen wird die Freisetzungsrate für Zirkaloy mit $2,9 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ (die Freisetzungsdauer entspricht 34.483 Jahre) modelliert.

POLLUX®-9: CSD-V

Die CSD-V-Kokillen werden in die Strecken 2.12b – 3.12b eingelagert. Die Mobilisierung der Radionuklide aus den verglasten Abfällen erfolgt kongruent mit der Korrosion der Glasmatrix. Die Glaskorrosion wird im Programm MARNIE über die Mobilisierungsstromdichte $j(t)$ in $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$

$$j(t) = A_{MOB} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right]\right) \quad (4.2)$$

berechnet /MAR 02/. Hierbei sind Q die Aktivierungsenergie in $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1}$, A_{MOB} die Gesamtmobilisierungsstromdichte zum Zeitpunkt t in $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ bei der Referenztemperatur T_R in K, R die allgemeine Gaskonstante in $\text{J} \cdot (\text{K} \cdot \text{kmol})^{-1}$ und T die Temperatur in K. Die Gleichung (4.2) wird in /KIE 12/ über die Langzeitkorrosionsrate $r_\infty(T)$ ohne die Referenztemperatur und mit der Einheit $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ angegeben.

$$r_\infty(T) = 5,6 \cdot 10^2 \cdot \exp\left(-\frac{7397}{T}\right) \quad (4.3)$$

Um die in /KIE 12/ angegebenen Raten in den MARNIE-Rechnungen verwenden zu können, muss Gleichung (4.3) mit der Referenztemperatur von $T_R = 298,15$ K und unter Zuhilfenahme von Gleichung (4.4) zu Gleichung (4.5) umgeformt werden.

$$r_{\infty}(T) = A_{MOB}(T_R) \cdot \exp\left(\frac{-7397}{T} - \frac{-7397}{T_R}\right) \quad (4.4)$$

$$r_{\infty}(T) = 9,40784 \cdot 10^{-9} \cdot \exp\left(\frac{-7397}{T} - \frac{-7397}{298,15}\right) \quad (4.5)$$

Die Gleichung (4.2) kann mit den MARNIE-Eingabewerten aus Tab. 4.8 als Gleichung (4.5) dargestellt werden.

Tab. 4.8 MARNIE-Eingabewerte zur Glaskorrosion

Eingabewert	Wert	Einheit
A_{MOB}	$1,0887 \cdot 10^{-13}$	$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$
Q	$6,15009 \cdot 10^{+07}$	$\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1}$
T_R	298,15	K
R	$8,3143 \cdot 10^{+03}$	$\text{J} \cdot (\text{K} \cdot \text{kmol})^{-1}$

POLLUX®-10: Brennstäbe aus DWR, SWR und WWER

Das Inventar der DWR-, SWR- und WWER-Brennstäbe setzt sich zusammen aus dem Inventar der Brennstoffmatrix und der Hüllrohre. In /PEI 11a/ sind Abbrandrechnungen für die Brennstoffmatrix aller Brennelementtypen vorgenommen worden. Jedoch wurden nur Aktivierungsrechnungen für Brennstabhüllrohre und Strukturteile aus DWR durchgeführt, die dann auch für die entsprechenden Abfälle anderer Reaktortypen Verwendung finden. Da ein genauer Belegungsplan für die POLLUX®-10-Behälter mit den verschiedenen Brennstabtypen nicht vorliegt, wurde entsprechend /LER 11a/ als Modellbeladung für eine Kombination einer Behälterbeladung von DWR- und Mischoxid(MOX)-Brennstäben im Verhältnis von 89 zu 11 ermittelt. Dabei wird nicht mehr zwischen Brennstäben aus DWR-, SWR- und WWER-Brennelementen unterschieden.

Die POLLUX®-10-Behälter mit den Brennstäben der DWR-, SWR- und WWER-Brennelemente werden in den Feldern Ost 3.12 bis 12.6 eingelagert. In einen POLLUX®-10-Behälter können die Brennstäbe aus 10 DWR- oder 30 SWR- oder 5

WWER-Brennelementen mit einer gemittelten Schwermetallmasse von 0,514 t_{SM} (Tonne-Schwermetall) pro DWR-BE, 0,172 t_{SM} pro SWR-BE und 0,115 t_{SM} pro WWER-BE /DÖR 12/ eingebracht werden. Die Abbrandrechnungen für die Brennstoffmatrix und die Aktivierungsrechnungen für die Hüllrohre bzw. Strukturteile in /PEI 11a/ beziehen sich jedoch auf die Tonne-Schwermetall t_{SM} des frischen Brennstoffs. Um das modellierte Radionuklidinventar, insbesondere in den Streckenverschluss nahen Einlagerungsstrecken, die bei einem angenommenen Zutritt von Lösung zuerst Radionuklide freisetzen könnten, nicht zu unterschätzen, wurden für die Bezugsgröße zur Berechnung des Inventars nicht die oben angegebenen Werte der Schwermetallmassen aus /DÖR 12/ übernommen, sondern auf die Schwermetallmassen der frischen Brennstoffmatrix bezogen. Bei einer Beladung der POLLUX[®]-10-Behälter mit DWR-Brennstäben ergeben sich damit 5,309 t_{SM} pro Behälter, für SWR-Brennstabbeladung 5,2401 t_{SM} . Für die Modellrechnungen wird die daraus resultierende Gesamtschwermetallmasse auf alle 2.120 eingelagerten POLLUX[®]-10-Behälter inklusive der WWER-Brennstäbe bzw. SWR-Brennstäbe bezogen, was eine gemittelte Beladung von 5,288 t_{SM} pro POLLUX[®]-10-Behälter ergibt. Insgesamt beläuft sich die Schwermetallmasse in den verwendeten 2.120 POLLUX[®]-10-Behältern somit auf 11.210 t_{SM} . Als Mindestzwischenlagerzeit der Brennelemente (Abklingzeit) sind in /LER 11a/ 49 Jahre angegeben, daher wird zur Bestimmung des Inventars der Brennstäbe die Altersklasse von 45 – 49 Jahren als Abklingzeit bis zur Einlagerung aus /PEI 11a/ angenommen.

Aufgrund des vorzeitigen Endes der Kernenergienutzung und einem damit verbundenen relativ höheren Anteil von MOX-Brennstäben gegenüber den ausstiegsbedingt reduzierten SWR- und DWR-Brennstäben wird in /LER 11a/ mit einem Mischungsverhältnis von UO₂-/MOX-Brennstäben von 8,9/1,1 pro POLLUX[®]-10 gerechnet. Dies wird bei den MARNIE-Rechnungen berücksichtigt.

Bei der Freisetzung aus einem Brennstab wird zwischen den drei Teilbereichen des Brennstabs unterschieden: (1) dem Gasraum, (2) der Brennstoffmatrix und (3) dem Hüllrohr. Die prozentualen Anteile der Radionuklide (bezogen auf deren Gesamtinventar in der Brennstoffmatrix bzw. Brennstabhülle) in der IRF der einzelnen Teilbereiche (IRF_{Matrix}: Gasraum und Brennstoffmatrix sowie IRF_{Hülle}) sind in Tab. 3.1 gegeben.

Die Freisetzungsrates aus der Auflösung der Brennstoffmatrix (2) unter Anwesenheit von genügend Lösung wird in /KIE 12/ mit 10^{-5} FIAP·d⁻¹ angegeben. FIAP ist als „Fraction of Inventory in the Aqueous Phase“ ein dimensionsloser Ausdruck für den gelösten Anteil.

Für das Hüllrohr (3) kann die C-14–Freisetzungsrates aus der korrosiven Auflösung der CSD-C Abfälle verwendet werden, da diese aus dem gleichen Material bestehen. Die C-14-Freisetzung aus der korrosiven Auflösung der CSD-C Abfällen wird von /KIE 12/ mit 34.482,8 a ($2,9 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$) angegeben. Es liegen keine weiteren Daten für andere Radionuklide vor, weshalb diese Rate auch für die anderen Radionuklide verwendet wird. Hierzu besteht F&E Bedarf. Die Freisetzungsdauer der einzelnen Teilbereiche eines Brennstabes (IRF_{Stab}) sowie der Brennstoffmatrix und des Hüllrohres sind in Tab. 4.9 angegeben.

In MARNIE wird für jedes Radionuklid das gesamte Inventar in einem POLLUX[®]-10-Behälter angegeben. Um die Freisetzung aus den Teilbereichen IRF_{Stab} , Brennstoffmatrix und Hüllrohr zu berechnen, muss für jedes Radionuklid sein Anteil am Inventar angegeben werden, der den einzelnen Teilbereichen zuzuordnen ist. Diese Anteile sind in Tab. A.14 aufgelistet.

Tab. 4.9 Freisetzungsdauer als MARNIE-Eingabewerte für die Teilbereiche IRF_{Stab} , Brennstoffmatrix und Hüllrohr eines Brennstabes

Eingabewert	Wert [a]
Freisetzungsdauer aus IRF_{Stab}	1
Freisetzungsdauer aus Brennstoffmatrix	273,97
Freisetzungsdauer aus Hüllrohr	33.333,5

Verpresste Strukturteile

Analog zu der Behandlung der Brennstäbe in den POLLUX[®]-10-Behältern wird für die verpressten Strukturteile das Inventar ebenfalls nur auf DWR-Brennelement-Strukturteile mit einem Mischungsverhältnis von 0,89 / 0,11 bezogen. Die Abklingzeit-Altersklasse von 45 – 49 Jahren und die Gesamt-Schwermetallmasse von 11.210 t_{SM} entspricht der der DWR-Brennelemente. Die Einlagerung in 2620 Gussbehälter Typ II erfolgt im Feld Ost 12.7. Die verpressten Strukturteile bestehen ebenso wie die Abfälle in den CSD-C-Kokillen aus Zirkaloy, weshalb für die verpressten Strukturteile eine Radionuklidlösungsrate auf Basis der Korrosionsrate für Zirkaloy von $2,9 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ (Freisetzungsdauer 34.482,8 a) verwendet wird. Die Freisetzung aus der Oxidschicht auf den verpressten Strukturteilen wird über eine IRF berücksichtigt (Tab. 3.1).

Urantails

Der Westflügel ist im Einlagerungsfahrplan von /LER 11a/ nicht berücksichtigt. Daher wird für das Feld West 1, in dem die Urantails eingelagert werden, ein Einlagerungsbeginn von 17,5 Jahren nach Inbetriebnahme des Endlagers und als durchschnittliche Abklingzeit 45 Jahre angenommen. In einem Konrad Typ VI Container werden 15.520 kg Urantails eingelagert (Tab. 5.8 in /PEI 11a/). Die Urantails lösen sich bei Wasserkontakt auf. Daher wird eine schnelle Freisetzung innerhalb eines Jahres angenommen.

Sonstige radioaktive Mischabfälle

Als Planungsgrundlage wird in /PEI 11b/ angenommen, dass 15.000 m³ sonstige radioaktive Mischabfälle in Konrad Typ IV Container, Gussbehälter Typ II und Betonbehälter Typ II ca. 32,5 Jahre nach Inbetriebnahme des Endlagers im Feld West 2 eingelagert werden. Als Berechnungsgrundlage dienen die in Tab. 4.10 angegebenen Volumen- und Behälterangaben. Da keine genaueren Angaben zur Freisetzung aus den sonstigen Abfällen in Konrad Typ IV und Gussbehältern Typ II bekannt sind, wird bei diesen Behälterttypen eine Auflösung der Abfälle bei Wasserkontakt angenommen und eine schnelle Freisetzung innerhalb eines Jahres modelliert. Durch die Zementphasen in den Betonbehältern Typ II muss eine eigene Freisetzungsrates angenommen werden, da sie sich von den anderen Behältern aus Eisen unterscheiden. Zementphasen lösen sich nach /KIE 13/ im Kontakt mit einer MgCl₂-Lösung innerhalb von 15 – 20 Jahren auf. Daher wurde für die Betonbehälter Typ II als Zeit bis zur vollständigen Auflösung 15 Jahre gewählt.

Tab. 4.10 Berechnungsgrundlagen für das Inventar eines Behälters aus dem Gesamtinventar der sonstigen radioaktiven Mischabfälle

Behälter	Nettoabfallvolumen [m ³]	Anzahl Behälter	Abfallvolumen [m ³ pro Behälter]
Konrad Typ IV	8.136	1.695	4,8
Gussbehälter Typ II	517	1.150	0,45
Betonbehälter Typ II	160	800	0,2

Graphithaltige Abfälle

Für das Feld West 3 wird angenommen, dass die graphithaltigen Abfälle 5 Jahre nach Inbetriebnahme des Endlagers (1.1.2035) eingebracht werden. Die graphithaltigen Abfälle werden in 313 Konrad Typ IV Container /BOL 11/ mit einem Nettovolumen von 3,195 m³ eingelagert. Bei der Optimierung des Flächenbedarfs der Einlagerungsbereiche /BOL 12/ ist vorgesehen, diese Abfälle in Gussbehälter Typ II einzulagern. Dies konnte in den Modellrechnungen nicht mehr berücksichtigt werden. Die Graphitabfälle unterscheiden sich in Ihrer Art von den AVR/THTR-Brennelementkugeln, weshalb hier nicht die AVR/THTR-Freisetzungsraten verwendet werden können. Für Graphitabfälle wurde ein Massenverlust bezogen auf die Oberfläche von $4,7 \cdot 10^{-10}$ bis $1,9 \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ bestimmt /KIE 13/. Die Angabe des Massenverlustes konnte nicht berücksichtigt werden, da keine Angaben zur Oberfläche der graphithaltigen Abfälle vorliegen und eine Umrechnung auf die Oberfläche der Graphitabfälle nicht vorgenommen werden konnte. Es wird daher mit einer schnellen Freisetzung innerhalb eines Jahres gerechnet.

4.3.2.5 Berücksichtigte Radionuklide

Für die Zusammenstellung des Inventars wurde zu Beginn der VSG eine Liste von relevanten Radionukliden erstellt (Tab. 4.11), die auf den in vorherigen Projekten wie EVEREST /CAD 96/, SPA /BAU 00/ und VERSI /RÜB 10/ berücksichtigten Radionukliden aufbaut. Die Liste enthält Spalt- und Aktivierungsprodukte mit Halbwertszeiten > 20 Jahren sowie Radionuklide aus der Thorium-, Neptunium-, Uran- und Actinium-Zerfallsreihe (Abb. 4.7, Tab. 4.11).

Tab. 4.11 Bei der Zusammenstellung für die MARNIE-Rechnungen verwendete Radionuklide und deren Halbwertszeiten nach /MAG 06/.

	Radionuklid	Halbwertszeit [a]	Radionuklid	Halbwertszeit [a]
Spalt- und Aktivierungsprodukte	Be-10	$1,60 \cdot 10^{+06}$	Mo-93	$3,50 \cdot 10^{+03}$
	C-14	5.730	Tc-99	$2,10 \cdot 10^{+05}$
	Cl-36	$3,00 \cdot 10^{+05}$	Pd-107	$6,50 \cdot 10^{+06}$
	Ca-41	$1,03 \cdot 10^{+05}$	Ag-108m	418
	Ni-59	$7,50 \cdot 10^{+04}$	Sn-126	$2,35 \cdot 10^{+05}$
	Ni-63	100	I-129	$1,57 \cdot 10^{+07}$
	Se-79	$4,80 \cdot 10^{+05}$	Cs-135	$2,00 \cdot 10^{+06}$
	Rb-87	$4,80 \cdot 10^{+10}$	Cs-137	30,17
	Sr-90	28,64	Sm-147	$1,06 \cdot 10^{+11}$
	Zr-93	$1,50 \cdot 10^{+06}$	Sm-151	93
	Nb-94	$2,00 \cdot 10^{+04}$	Ho-166m	1.200
Thorium Reihe (4N)	Cm-248	$3,40 \cdot 10^{+05}$	U-236	$2,34 \cdot 10^{+07}$
	Pu-244	$8,0 \cdot 10^{+07}$	Th-232	$1,41 \cdot 10^{+10}$
	Pu-240	6.563	U-232	68,9
Neptunium Reihe (4N + 1)	Cm-245	8.500	U-233	$1,59 \cdot 10^{+05}$
	Am-241	432,2	Th-229	7.880
	Np-237	$2,14 \cdot 10^{+06}$		
Uran Reihe (4N + 2)	Cm-246	4.730	Pu-238	87,74
	Pu-242	$3,75 \cdot 10^{+05}$	U-234	$2,46 \cdot 10^{+05}$
	U-238	$4,47 \cdot 10^{+09}$	Th-230	$7,54 \cdot 10^{+04}$
	Am-242m	141	Ra-226	1.600
Actinium Reihe (4N + 3)	Cm-247	$1,56 \cdot 10^{+07}$	U-235	$7,04 \cdot 10^{+08}$
	Am-243	7.370	Pa-231	$3,28 \cdot 10^{+04}$
	Pu-239	$2,41 \cdot 10^{+04}$	Ac-227	21,773

Das nuklidspezifische Inventar zu Beginn der Nachverschlussphase ist in Tab. A.14 angegeben.

Bei der Berechnung der Zerfallsketten werden einige Tochter- bzw. Mutternuklide, die im Vergleich zu ihren Mutter- bzw. Tochternukliden relativ kurze Halbwertszeiten haben, nicht berücksichtigt, und den vorhandenen Aktivitätsinventaren der Mutter-/Tochternuklide hinzu addiert.

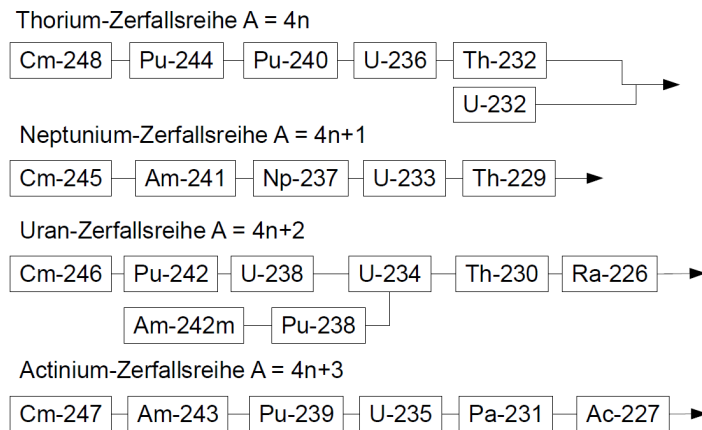


Abb. 4.7 In den Rechnungen mit MARNIE verwendete Nuklide der Zerfallsreihen. Halbwertszeiten der einzelnen Nuklide s. Tab. 4.11

4.3.2.6 Löslichkeiten

Die Löslichkeitsgrenzen der berücksichtigten Radionuklide (Tab. 4.12) sind in /KIE 12/ für NaCl- und MgCl₂-Lösungen bei einem pH-Wert von 6 und 9 angegeben. Bei den in das Endlager über den Schacht und Infrastrukturbereich eindringenden Wässern handelt es sich um Mg-gesättigte Lösungen. Dies wird durch die geotechnische Maßnahme des Einbringens von Bischofit in den Infrastrukturbereich der 840 m-Sohle erreicht. Aus diesem Grund werden für die Löslichkeitsgrenzen die Werte für gesättigte MgCl₂-Lösung verwendet. Durch die Anwesenheit von Sorelphasen kann die Einhaltung eines pH-Wertes von 9, bei dem die Löslichkeitsgrenzen niedriger sind als bei pH-Werten von 6, für die im Endlager vorliegenden Lösungen angenommen werden.

In /KIE 12/ werden für einzelne Elemente keine Löslichkeitsgrenzen angegeben (Tab. 4.12). Für diese Elemente wird bei den MARNIE-Rechnungen angenommen, dass sie nicht löslichkeitsbegrenzt sind. D. h., sie werden in der zur Verfügung stehenden Lösungsmenge als vollständig aufgelöst angenommen.

Tab. 4.12 Löslichkeitsgrenzen C_{i0} [$\text{kg} \cdot (\text{kg H}_2\text{O})^{-1}$] in MARNIE auf Basis der Daten aus /KIE 12/ für eine Mg-gesättigte Lösung bei pH 9

Element	C_{i0} [$\text{kg} \cdot (\text{kg H}_2\text{O})^{-1}$]	Element	C_{i0} [$\text{kg} \cdot (\text{kg H}_2\text{O})^{-1}$]
Be	o. A.	Sn	o. A.
C	o. A.	I	o. A.
Cl	o. A.	Cs	o. A.
Ca	o. A.	Sm	$7,65 \cdot 10^{-3}$
Ni	o. A.	Ho	o. A.
Se	o. A.	Cm	o. A.
Rb	o. A.	Pu	$2,40 \cdot 10^{-6}$
Sr	o. A.	U	$7,55 \cdot 10^{-4}$
Zr	$9,15 \cdot 10^{-5}$	Th	$2,33 \cdot 10^{-4}$
Nb	o. A.	Am	$7,65 \cdot 10^{-3}$
Mo	o. A.	Np	$7,52 \cdot 10^{-5}$
Tc	$9,92 \cdot 10^{-5}$	Ra	o. A.
Pd	o. A.	Pa	o. A.
Ag	o. A.	Ac	o. A.

o. A. – Keine Löslichkeitsgrenze angegeben

4.3.3 Betrachtete Rechenfälle

4.3.3.1 Rechenfälle zum Referenzszenarium

Im Referenzszenarium bleibt die Integrität der geologische Barriere des ewG nach den Ergebnissen in /KOC 12/ erhalten, die Dichtelemente im Schacht, die Streckenverschlüsse und die Dichtpfropfen in den Querschlägen behalten ihre auslegungsgemäßen Eigenschaften /MÜL 12b/ bis zum Ende ihrer Funktionsdauer von 50.000 Jahren. Nach 50.000 Jahren werden die Permeabilitäten aller Dichtelemente und Verschlüsse als um den Faktor 1.000 erhöht angenommen.

Die Restporosität des Salzgrusversatzes wird mit 1 % +/- 1 % /POP 12/ angenommen. Dabei wird für die Restporosität von 1 % nach /POP 12/ angenommen, dass keine Advektion stattfindet. Dies wird rechtechnisch durch Verwendung eines Permeabilitätswertes von 10^{-22} m^2 umgesetzt (Kap. 4.3.1), was zu einer gegenüber der Diffusion vernachlässigbaren Advektion führt. Als oberer Wert für die Diffusionskonstante wird $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen, diese wird für alle Strecken im Endlager angesetzt. Alle anderen in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Annahmen und Randbedingungen werden berücksichtigt.

Zusätzlich werden Parametervariationen auf Basis des Referenzszenariums durchgeführt, d. h., für einzelne FEP werden Rechenfälle entwickelt, in denen innerhalb der wahrscheinlichen Ausprägungen von wahrscheinlichen FEP eine Parameterungewissheit angesetzt wird. Dabei werden die Kompaktionsgeschwindigkeit, die Restporosität und die Diffusionskonstante variiert (Tab. 4.13). Bei der angenommenen Restporosität von 2 % mit unterstellter Advektion ergibt sich aufgrund der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung eine Permeabilität von $7,3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.

In dem Rechenfall PV-R4 werden als Modellungswissheit die Eigenschaften der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 (Abb. 3.1) für die Strukturteile variiert. Der Einfluss dieser Strecke auf das Systemverhalten ist wegen ihrer Nähe zum östlichen Streckenverschluss von besonderem Interesse. In den bisherigen Rechenfällen wird diese Einlagerungsstrecke bezüglich des Kompaktionsverhaltens wie alle anderen Einlagerungsstrecken im Ostflügel behandelt, d. h., das Volumen der Einlagerungsbehälter – welches möglicherweise als Speicherraum für Fluide zur Verfügung stünde – wird in den Modellen nicht berücksichtigt. In diesem Rechenfall wird jedoch in dem für die Einlagerung der Behälter vorgesehenen Streckenabschnitt Ost 12.7 das Volumen der Gebinde berücksichtigt und die Porosität auf 25 % gesetzt. Eine Kompaktion findet in diesem Streckenabschnitt nicht statt. Die Diffusionskonstante wird aufgrund der höheren Porosität in diesem Bereich spezifisch für diesen Rechenfall mit einem Wert von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen. Da der an den Querschlag angrenzende Abschnitt der Strecke bis zum ersten eingelagerten Behälter vollständig mit Salzgrus versetzt wird, werden hier die Eigenschaften nicht verändert, d. h., an dieser Stelle findet weiterhin Kompaktion bis zur Restporosität von 1 % statt.

Die Rechnungen erfolgen für die Einlagerungsvarianten AB1 und B1. Im Falle einer Restporosität von 2 % mit unterstellter Advektion werden die Rechnungen für die Einlagerungsvariante AB1 nur der Vollständigkeit halber durchgeführt, obwohl die Trans-

portvorgänge im Westflügel durch die Nicht-Berücksichtigung des Gasgegendruckes mit MARNIE nicht adäquat ermittelt werden können (Kap. 4.3.1). Durch die Wechselwirkung zwischen West- und Ostflügel werden die Ergebnisse als wenig belastbar eingeschätzt. Sie ergeben aber unter Einbeziehung der mit TOUGH2 durchgeführten Zwei-Phasenflussrechnungen einen Einblick in die Wechselwirkungen zwischen den beiden Endlagerflügeln und die hierfür verantwortlichen Prozesse. Sie tragen somit zum Systemverständnis für den reinen Lösungstransport bei. In Tab. 4.13 sind die zum Referenzszenarium durchgeführten Simulationsrechnungen aufgeführt.

Tab. 4.13 Rechenfälle und wichtige Parameter der MARNIE Berechnungen zum Referenzszenarium

Rechenfall*/ Referenzszenarium	Bez.	End- lager- variante	Kompaktion	Restporosität [%]/ Permeabilität [m ²]	Diff.konst. [m ² ·s ⁻¹]
Referenzszenarium	R1	AB1	schnell	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Kompaktion	PV-R1	AB1	langsam	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Restporosität	PV-R2	B1	schnell	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Restporosität + Kompaktion	PV-R3	B1	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Restporosität + Kompaktion + Strecke Ost 12.7	PV-R4	B1	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰ Ost 12.7 1·10⁻⁰⁹
Parametervariation Restporosität + Kompaktion + Diffusionskonst.	PV-R5	B1	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10⁻¹¹
Parametervariation Restporosität + Kompaktion	PV-R6	AB1	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Restporosität	PV-R7	AB1	schnell	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰

* Fettgedruckt sind die variierten Parameter im Rechenfall.

4.3.3.2 Alternativszenarium Schachtverschlussversagen

Im Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* wird abweichend von der Beschreibung in /BEU 12/ ein Versagen der Dichtelemente beider Schächte direkt nach dem Verschluss des Endlagers angenommen, für die Permeabilität der Dichtelemente im Schacht wird $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ als integrale Permeabilität angesetzt. Die Streckenverschlüsse und die Dichtpfropfen in den Querschlägen behalten ihre auslegungsgemäßen Eigenschaften (Porosität und Permeabilität) bis zum Ende ihrer Funktionsdauer von 50.000 Jahren /MÜL 12b/. Alle übrigen bereits für das Referenzszenarium beschriebenen Annahmen und Randbedingungen werden beibehalten.

Wie im Referenzszenarium werden auch für das Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* Variationen aufgrund von Parameterungewissheiten innerhalb der wahrscheinlichen Ausprägung der FEP durchgeführt. Dabei werden ebenfalls die Kompaktionsgeschwindigkeit („langsam“, „schnell“) und die Restporosität (1 % – 2 %) variiert. Bei einer Restporosität von 1 % im Versatz findet keine Advektion statt /POP 12/. Für die Restporosität 2 % wird Advektion unterstellt und die zugehörige Permeabilität wird nach der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung (Kap. 3.3) berechnet. Zusätzlich wird die Diffusionskonstante variiert und die Modellierung der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile (Abb. 3.1), wie für das Referenzszenarium bereits beschrieben (Kap. 4.3.3.1), verändert. Die Rechnungen werden für die Einlagerungsvariante AB1 und die Variante B1 durchgeführt. Die Variationsrechnung mit einer Restporosität von 2 % erfolgt nur für die Variante B1.

In Tab. 4.14 sind die zum Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* durchgeführten Simulationsrechnungen aufgeführt.

Tab. 4.14 Rechenfälle und wichtige Parameter der MARNIE Berechnungen zum Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen*

Rechenfall*/ Alternativszenarium	Bez.	Einlage- rungs- variante	Kompak- tion	Restporosität [%]/ Permeabilität [m ²]	Diff.konst. [m ² ·s ⁻¹]
Schachtverschluss- versagen	A1	AB1	schnell	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Kompaktion	PV-A1	AB1	langsam	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Restporosität	PV-A2	B1	schnell	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Restporosität + Var. Ost 12.7	PV-A3	B1	schnell	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰ Ost 12.7 1·10⁻⁰⁹
Parametervariation Restporosität + Kompaktion	PV-A4	B1	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰
Parametervariation Restporosität + Kompaktion + Var. Ost 12.7	PV-A5	B1	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰ Ost 12.7 1·10⁻⁰⁹
Parametervariation Restporosität + Kompaktion + Diffusionskonstante	PV-A6	B1	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10⁻¹¹

* Fettgedruckt sind die variierten Parameter

4.3.3.3 Alternativszenarium Streckenverschlussversagen

Im Alternativszenarium *Streckenverschlussversagen* wird das Versagen eines Streckenverschlusses direkt nach dem Verschluss des Endlagers angenommen, wobei die integrale Permeabilität eines der beiden Streckenverschlüsse mit 1·10⁻¹⁵ m² angesetzt wird und dabei um 2,5 Größenordnungen höher als der entsprechende Wert für den intakten Schachtverschluss liegt. Die Dichtelemente im Schacht und die Dichtpfropfen in den Querschlägen behalten ihre auslegungsgemäßen Eigenschaften (Porosität und Permeabilität) bis zum Ende ihrer Funktionsdauer von 50.000 Jahren /MÜL 12b/. Alle übrigen für das Referenzszenarium beschriebenen Annahmen und Randbedingungen werden beibehalten (Tab. 4.15).

Tab. 4.15 Rechenfälle und wichtige variierte Parameter der MARNIE Berechnungen zum Alternativszenarium *Streckenverschlussversagen* (Einlagerungsvariante AB1)

Rechenfall*/ Alternativszenarium	Kompaktion	Restporosität [%]/ Permeabilität [m ²]	Diff.konst. [m ² ·s ⁻¹]
Streckenverschlussversagen	schnell	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰
Streckenverschlussversagen	langsam	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰

* Fettgedruckt sind die variierten Parameter im Rechenfall

4.3.3.4 What-if-Rechnungen zum Systemverständnis und zur Bewertung der Robustheit der Sicherheitsaussage

What-if-Rechnungen werden auf Basis des Referenzszenariums und des Alternativszenariums *Schachtverschlussversagen* durchgeführt. Sie beschreiben Änderungen außerhalb der wahrscheinlichen bzw. weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP.

What-if Rechnungen auf Basis des Referenzszenariums

Um ein Systemverständnis – auch über die Systemrobustheit – zu gewinnen und Kenntnis zum Einfluss wesentlicher Parameter über die Grenzen ihrer Ausprägung hinaus auf die Ergebnisse zu erlangen, werden in den What-if-Rechnungen Werte für die Parameter in Ansatz gebracht, die im Hinblick auf den Lösungstransport Extrembetrachtungen zur Untersuchung der Robustheit des Systemverhaltens sind. In diesen Rechnungen wird der Einfluss einer erhöhten Diffusionskonstante und unterschiedlicher Freisetzungsraten aus den Hüllrohren und Strukturteilen untersucht. Zusätzlich wird die Modellierung der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile (Abb. 3.1), wie im Kap. 4.3.3.1 beschrieben, verändert. Da im Referenzszenarium nur bei der Parametervariation „Restporosität 2 % mit unterstellter Advektion“ Lösung an die Behälter gelangen kann, werden die nachfolgenden Rechnungen auf dieser Grundlage für die Einlagerungsvariante B1 durchgeführt. In den Rechnungen wird konservativ die „langsame“ Kompaktion angenommen.

Tab. 4.16 What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Referenzszenariums (Einlagerungsvariante B1)

Rechenfall*/ What-if-Rechnung	Bez.	Restporosität [%]/ Permeabilität [m ²]	Diff.konst. [m ² ·s ⁻¹]
Erhöhte Diff.konst. 1	WI-R1	2 7,3·10 ⁻¹⁹	5·10⁻¹⁰
Erhöhte Diff.konst. 2	WI-R2	2 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10⁻⁹
Erhöhte Diff.konst 2 + Var. Ost 12.7	WI-R3	2 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10⁻⁹
Erhöhte Diff.konst 2 + schnelle Freisetzung aus Hüllrohren u. Strukturteilen	WI-R4	2 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10⁻⁹
Erhöhte Diff.konst 2 + schnelle Freisetzung aus Hüllrohren u. Strukturteilen + Var. Ost 12.7	WI-R5	2 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10⁻⁹

* Fettgedruckt sind die variierten Parameter im Rechenfall.

What-if-Betrachtungen auf Basis des Alternativszenariums Schachtverschlussversagen

Abweichend von der o. a. Beschreibung des Alternativszenariums *Schachtverschlussversagen* wird hier in allen Rechenfällen für die Einlagerungsvariante B1 unterstellt, dass die Dichtelemente in beiden Schächten direkt nach ihrem Verschluss eine erhöhte Permeabilität von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ haben. In einer ersten Rechnung wird eine Restporosität von 1 % mit der rechentechnisch bedingten geringfügigen Permeabilität angenommen. In weiteren Variationen wurde diese Restporosität auf 2 % mit der nach der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung ermittelten zugehörigen Permeabilität erhöht. In den Rechnungen wird sowohl der Einfluss der „schnellen“ als auch der „langsamen“ Kompaktion untersucht. In einem Rechenfall wurde die Modellierung der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile (Abb. 3.1), wie im Kap. 4.3.3.1 beschrieben, verändert.

Tab. 4.17 What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Alternativszenariums *Schachtverschlussversagen*

Rechenfall */ What-if-Rechnung	Bez.	Kompak- tion	Restporosität [%]/ Permeabilität [m ²]	Diff.konst. [m ² ·s ⁻¹]
Erhöhte Permeabilität Dichtelemente Schacht	WI-A1	schnell	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰
Erhöhte Permeabilität Dichtelemente Schacht + Kompaktion	WI-A2	langsam	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰
Erhöhte Permeabilität Dichtelemente Schacht + Kompaktion + Var. Strecke Ost 12.7	WI-A3	langsam	1 1·10 ⁻²²	1·10 ⁻¹⁰ 1·10⁻⁰⁹
Erhöhte Permeabilität Dichtelemente Schacht + Restporosität	WI-A4	schnell	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰
Erhöhte Permeabilität Dichtelemente Schacht + Kompaktion + Restporosität	WI-A5	langsam	2 7,3·10⁻¹⁹	1·10 ⁻¹⁰

* Fettgedruckt sind die variierten Parameter im Rechenfall

4.4 Modellierung mit dem Programm TOUGH2 und die betrachteten Rechenfälle

Das Konzept zur Erstellung des TOUGH2-Gittermodelles, welches als Berechnungsgrundlage für die Modellierungen des Zweiphasenflusses dient, sowie das verwendete Kompaktionsmodell werden in Kap. 4.2 beschrieben. Im Folgenden werden die TOUGH2 spezifischen Modellannahmen und Rechenfälle dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung der TOUGH2-Modellannahmen und Eingabeparameter befindet sich in /FRI 12/ und im Anhang A.2.2.

4.4.1 Gasentwicklung

Für die Modellierung der Gasentwicklung und des Radionuklidtransports wird nur die anaerobe Metallkorrosion der Endlagerbehälter betrachtet, da diese im Vergleich zu anderen Gasbildungsprozessen schneller abläuft und da die abfallnah eingebrachten Lösungen mit diesem Prozess verbraucht sind, so dass danach kein anderer Gasbil-

dungsprozess stattfinden kann /FRI 12/. Im Modell erfolgt die Berechnung der Korrosion vereinfacht in Abhängigkeit vom Behältertyp. Deshalb ergeben sich Bereiche im Endlagermodell in welchen die gleiche Gasbildungsrate herrscht (s. Materialgebiete mit im Wesentlichen gleichen Behältertypen: EINL1 – EINL9 in den Anhängen A.2.2 und A.6).

Im Berechnungsmodell wird angenommen, dass Korrosion sofort nach Endlagerverschluss mit der verfügbaren Restfeuchte beginnt. Die Gasbildung (s. Kap. 3.3.4) resultiert aus der stöchiometrischen Reaktionsgleichung der anaeroben Metallkorrosion (/FRI 12/). Die Korrosionsraten werden in Rechenfällen variiert, um Unsicherheiten in Bezug auf das geochemische Milieu abzudecken. Für die Rechenfälle des Referenzszenariums werden Korrosionsraten von 0,04 – 15 $\mu\text{m/a}$ (0,04; 0,1; 5,1; 15) berücksichtigt. Die obere Grenze der Korrosionsrate wird für die Rechenfälle der Alternativszenarien ohne Lösungszutritt auf 100 $\mu\text{m/a}$ festgelegt. Die Korrosionsrate liegt etwas niedriger als diejenige, welche in /MÖH 11/ für das sogenannte „*feuchte Szenario*“ (150 $\mu\text{m/a}$ = vollständige Wassersättigung) angenommen wird, da die Lösungssättigungen in den vorliegenden Rechenergebnissen wesentlich niedriger liegen. Die Rechenfälle mit ihren entsprechenden Korrosionsraten sind in Kap. 4.4.3 dargestellt.

Aufgrund der hohen Metallmassen ist die zur Verfügung stehende Feuchtigkeitsmenge der limitierende Faktor der Korrosion. Die zur Korrosion zur Verfügung stehende Wassermasse für die einzelnen Materialgebiete ist in Kap. 3.3.4 beschrieben. Sie besteht in erster Linie aus der Lösungsmenge der mit dem trockenen Salzgrusversatz eingebrachten und der initial in den Behältern verbliebenen Feuchtigkeit (s. Tab. 3.4). Die aus der thermochemischen Sulfatreduktion entstehende Lösung im Zusammenhang mit den Kohlenwasserstoffvorkommen wird in den jeweiligen Bereichen zur Wassermasse addiert.

4.4.2 Radionuklidfreisetzung und -transport

Wie im Kap. 4.1.2 beschrieben, kann mit dem EOS7R-Modul von TOUGH2 der Radionuklidtransport von zwei Radionukliden in der Gas- und Flüssigphase berechnet werden. Da der Transport von Radionukliden in der flüssigen Phase von MARNIE vollständig (inkl. Zerfallsreihen) beschrieben werden kann, wird in TOUGH2 der Fokus auf Radionuklide gelegt, die möglicherweise verstärkt oder ausschließlich in der gasförmigen Phase transportiert werden.

Zum Zeitpunkt der Analysen in /KOC 12/ existierten noch keine verlässlichen Angaben zu Restfeuchtigkeitsmassen in den Brennelement-Behältern im Zusammenhang mit defekten Brennstäben. Es lagen zu diesem Zeitpunkt nur Maximalabschätzungen vor, so dass für die Rechnungen der Integrität der geologischen Barriere im Innenraum eines jeden POLLUX[®]-10-Behälters eine maximal verfügbare Menge von 18 kg Restfeuchtigkeitsmasse angenommen wurde. Diese beruhte auf der Annahme, dass sämtliche Brennstäbe bei Entnahme aus dem Reaktor defekt sind und damit eine hohe Restfeuchte enthalten. Nach der damaligen und in /KOC 12/ übernommenen Modellvorstellung wurden diese Brennstäbe somit ohne weitere Maßnahmen in POLLUX[®]-Behälter eingelagert.

In einer aktualisierten Fassung von /DÖR 12/ wird nach einer Recherche bei den Abfallverursachern festgestellt, dass diese Restfeuchtigkeitsmassen unrealistisch hoch sind, da es Richtlinien gibt, wie mit defekten Brennstäben vor der Zwischenlagerung umgegangen wird. Realistisch sind Restfeuchtigkeitsmassen von ca. 60 g pro Brennelement-Behälter /DÖR 12/. Eine Aufstellung der Restfeuchtigkeitsmassen für die einzelnen Behältertypen ist im Kap. 3.3.4 sowie /FRI 12/ enthalten. In den folgenden Rechenfallbeschreibungen (s. Kap. 4.4.3) werden aus Gründen der Vollständigkeit und Vergleichbarkeit zu /KOC 12/ beide Restfeuchtigkeitsmassen – 18 kg und 60 g pro Brennelemente-Behälter – berücksichtigt.

Bezogen auf die Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen (Kap. 3.2.2) sowie der Modellvorstellung zur Freisetzung der IRF (Kap. 4.2.5) und im Hinblick auf die Zielsetzung, mit TOUGH2 vor allem den Transport volatiler Radionuklide bzw. ihrer chemischen Verbindungen zu betrachten, liegt der Fokus der Berechnungen auf der Untersuchung der volatilen IRF abdeckend über den C-14-Transport mittels CO₂.

Für die mit TOUGH2 betrachteten Rechenfälle wurden die in Tab. 4.18 angegebenen Radionuklidmassen der IRF benutzt. In vielen Fällen ist die IRF nicht genau bekannt (Kap. 4.2.5), dies gilt insbesondere für die Abfälle im Westflügel. Die Ermittlung der IRF und der gasförmigen Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen ist ein Bereich, in welchem weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sind, um die Auswirkungen des Gaspfads beim Radionuklidtransport besser berechnen zu können. Für die Abfälle in den POLLUX[®]-9-Behältern mit CSD-C Abfällen ist eine Betrachtung der IRF nicht notwendig, da aus technischen Gründen der Wiederaufarbeitung der Abfälle keine IRF vorhanden ist (s. Kap. 4.2.5). Im Hinblick auf die Untermauerung des Systemverständnisses wird trotzdem ein Rechenfall diesbezüglich betrachtet.

Tab. 4.18 Verwendete Radionuklidmassen für TOUGH2 Rechnungen

Radio-nuklid	Behälter- typ	Be- hälter- zahl	Abfalltyp	IRF-Anteil [%]	IRF - Masse RN insgesamt [kg]	IRF - Masse RN pro Behälter [kg]
C-14	POLLUX® -10	2120	BE	10 (s. Kap. 4.2.5)	0,101	$4,76 \cdot 10^{-5}$
C-14	POLLUX® -9	906 ¹	CSD-C	20 (s. Kap. 4.2.5)	0,0684	$7,54 \cdot 10^{-5}$
C-14	Gussbehä- lter Typ II	2620	BE- Struktur- teile	20 (s. Kap. 4.2.5)	0,0068	$2,6 \cdot 10^{-6}$
C-14	Container Typ IV	1695	Nicht spezifizierte Abfälle (West 2)	0,02 (s /BRA 05/)	0,0006	$3,54 \cdot 10^{-7}$
I-129	POLLUX® -10	2120	BE	10 (s. Kap. 4.2.5)	5,87	$2,77 \cdot 10^{-3}$

¹ Die CSD-C-Behälteranzahl beträgt real 456, die hier modelltechnisch angegebene Zahl bezieht sich auf alle POLLUX®-9 Behälter des entsprechenden Materialgebiets.

Zusätzlich werden für lange Zeiträume ebenfalls Transportanalysen für I-129 durchgeführt. Dessen Verbindung I₂ ist deutlich weniger volatil (s. Tab. 4.19) und deshalb primär in der flüssigen Phase vorhanden. Dennoch könnten Prozesse wie etwa Diffusion oder Sublimation in der Gasphase (s. Tab. 4.19) besonders unter Berücksichtigung der langen Halbwertszeit von I-129 von Bedeutung sein.

Bei allen Rechnungen wird eine Adsorption von Radionukliden an eine Festphase nicht unterstellt. Der radioaktive Zerfall während des Transports wird mit den entsprechenden Halbwertszeiten (s. Tab. 4.19) in den Berechnungen berücksichtigt. Eine Diffusion der Komponenten in der Flüssig- und Gasphase wird ebenfalls betrachtet. Ein Austausch der Komponenten zwischen den Phasen erfolgt über die physikalische Gleichgewichtskonstante (Henry-Koeffizient). Die chemische Reaktion (Dissoziation) z. B. von CO₂ mit Wasser wird dagegen in den Rechnungen nicht betrachtet. Das bedeutet, dass der Anteil von CO₂ und damit auch C-14 in der Gasphase gegenüber der flüssigen Phase in den Rechnungen überschätzt wird.

Der physikalische Prozess des Austausches von Komponenten zwischen den Phasen wird durch das Henry Gesetz beschrieben werden. Dabei ist ein Anteil einer gasförmigen Verbindung physikalisch in einer flüssigen Phase gelöst. Das Verhältnis zwischen

dem Partialdruck des Gases und seiner Konzentration in der flüssigen Phase wird durch den so genannten Henry-Koeffizienten im Henry Gesetz wie folgt beschrieben:

$$P_g = H_{gw} * x_w \rightarrow H_{gw} = \frac{P_g}{x_w} \quad (4.6)$$

H_{gw} = Henry-Koeffizient [$\text{m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{mol}$]

P_g = Partialdruck in der Gasphase [Pa]

x_w = Molfraktion in der Flüssigphase [mol]

Strenggenommen ist das Henry Gesetz nur für kleine und mäßige Drücke bis zu einem Wert von ungefähr 5 bar anwendbar und es ist nur für verdünnte Lösungen gültig. Weiterhin ist der Henry-Koeffizient temperaturabhängig. Mit steigender Temperatur fällt die Löslichkeit der Gasphase in der Flüssigphase und damit auch die Löslichkeit des volatilen Radionuklids bzw. seiner Verbindung in der Flüssigphase. Dieser temperaturabhängige Prozess ist im TOUGH2 Berechnungsprogramm bisher nicht implementiert.

Das heißt, dass die Konzentration von CO_2 und damit auch C-14 in der flüssigen Phase in einem warmen Gebiet (z. B. direkt neben den Behältern) überschätzt und damit das volatile C-14 in der Gasphase unterschätzt wird. Die Bewegung von gasförmigen CO_2 in kältere Gebiete (z. B. Richtstrecken, Querschläge) führt zu einem Übertritt des gasförmigen CO_2 in die flüssige Phase, so dass die Unterschätzung von C-14 im Gas ein lokaler Effekt in der Umgebung der Behälter darstellt. Diesem Effekt wird in den Modellen dadurch entgegengewirkt, dass die gesamte gasförmig freigesetzte IRF instantan und vollständig in den Porenraum der Einlagerungsstrecke des Modells freigesetzt wird, so dass in den Modellen insgesamt eine deutliche Überschätzung der freigesetzten C-14 Menge stattfindet.

Während im Zentrum des Ostflügels auch in den Richtstrecken noch relativ hohe Temperaturen erreicht werden (ca. $95 \text{ }^\circ\text{C}$ nach 500 a, /BOL 12/), sind im mittleren Querschlag Temperaturen $< 50 \text{ }^\circ\text{C}$ berechnet worden /BOL 12/. Insgesamt werden in den Berechnungen die Henry-Koeffizienten für eine Temperatur von $60 \text{ }^\circ\text{C}$ verwendet. Dies wird als abdeckend angesehen, da diese angenommene Temperatur im Vergleich zur in /BOL 12/ errechneten Temperatur in den Richtstrecken und Streckenverschlüssen erhöht ist. Damit erfolgt eine weitere Überschätzung des CO_2 (und damit C-14) Gasanteils. In diesem Fall findet die Überschätzung dort statt, wo die Freisetzung aus dem Endlager erfolgt, d. h., wo sich der Berechnungsort für die Radionuklidfreisetzung im

Modell befindet (an den Streckenverschlüssen). Insgesamt bringen beide Annahmen, die der vollständigen und instantanen volatilen Freisetzung des IRF-Anteils in den Porraum und die der erhöhten Temperatur, große Konservativitäten in die Berechnungen ein. In zukünftigen Analysen sollten diese abgebaut und realistische Freisetzungsraten sowie die ortspezifische Temperaturabhängigkeit des Henry-Koeffizienten berücksichtigt werden.

In /SAN 99/ sind Henry-Koeffizienten k_H° für Normalbedingungen angegeben (25 °C). Diese wurden für eine Temperatur T (hier 60 °C) mit folgender Beziehung zu einem Henry-Koeffizienten k_H umgerechnet:

$$k_H(T) = k_H^\circ \cdot \exp \left[\frac{d(\ln(k_H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^\circ} \right) \right] \quad (4.7)$$

Dabei ist k_H° der Henry-Koeffizient bei einer Referenztemperatur T° (25 °C) und $\frac{d(\ln(k_H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$ die sog. Temperaturabhängigkeitskonstante (s. Tab. 4.19).

In Tab. 4.19 sind für die zwei betrachteten volatilen Radionuklide C-14 und I-129 in der jeweiligen chemischen Verbindung in der Gasphase die entsprechenden Henry-Koeffizienten als Kehrwerte (Volatilität) angegeben. Außerdem sind die angenommenen Gas- und Flüssigkeitsdiffusionskoeffizienten dargestellt.

Tab. 4.19 Parameter für den Radionuklidtransport in der Gas- und Flüssigphase

Radionuklid	C-14	I-129
Halbwertszeit [a]	5.730	$1,57 \cdot 10^{+07}$
chemische Verbindung	CO ₂	I ₂
Molmasse [g/mol]	44	258
Inverser Henry-Koeffizient (aus /SAN 99/ bei 25°C) [1/Pa]	$6,045 \cdot 10^{-09}$	$5,51 \cdot 10^{-07}$
Inverser Henry- Koeffizient (berechnet, bei 60°C) [1/Pa]	$2,594 \cdot 10^{-09}$	$9,37 \cdot 10^{-09}$
Temperaturabhängigkeitskonstante $\frac{d(\ln(k_H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$ (aus /SAN 99/)	2.400	4.600
Gasdiffusionskoeffizient	$1 \cdot 10^{-08}$	$1 \cdot 10^{-08}$
Flüssigkeitsdiffusionskoeffizient	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$

4.4.3 Betrachtete Rechenfälle

Bei der Szenarientwicklung /BEU 12/ wurde angenommen, dass alle POLLUX[®] Behälter 500 Jahre lang aerosoldicht bleiben. Demgegenüber wird als Prämisse in den betrachteten Rechenfällen der radiologischen Konsequenzenanalyse davon ausgegangen, dass alle POLLUX[®] Behälter 500 Jahre lang gasdicht sind. Diese Prämisse, die in nachfolgenden Analysen Verwendung findet, ist durch zusätzliche F&E-Arbeiten zu untermauern.

In den betrachteten Rechenfällen wird angenommen, dass die vorhandene Lösung sowohl zur Korrosion (s. Kap. 3.3.4 und Kap. 4.4.1) als auch für die Entstehung von CO₂ (in welchem das C-14 gebunden wird, s. Kap. 4.2.5 und Kap. 4.4.2) zur Verfügung steht. Für beide Prozesse wird jeweils die ermittelte vollständige Lösungsmenge als Anfangsbedingung der ablaufenden Prozesse (Metallkorrosion, CO₂-Bildung) postuliert. Das heißt, die ermittelte Lösungsmenge wird dementsprechend zweimal verbraucht. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die Lösungsmenge weiterhin als Transportmedium der Lösungsphase zur Verfügung steht. Dies bedeutet eine große Konservativität auf Seiten des Transports durch das Endlagersystem und der Radionuklidfreisetzung aus dem Behälter. In zukünftigen Sicherheitsanalysen sollte diese Konservativität abgebaut werden³.

Eine weitere Vereinfachung und möglicherweise eine weitere in zukünftigen Analysen abzubauenende Konservativität entsteht dadurch, dass in den Rechenfällen die IRF zum Zeitpunkt ihrer Freisetzung instantan und vollständig außerhalb des Behälters zur Verfügung steht. Tatsächlich würde sowohl bei defekten als auch bei 500 Jahre gasdichten Behältern die IRF über einen gewissen (allerdings unbekanntem) Zeitraum aus dem Behälter austreten, da aufgrund des freien Porenraums im Behälter dieser eher einen Unterdruck gegenüber dem aufbauenden Gasdruck in den Porenräumen des kompaktierenden Versatzes aufweist. In den Rechenfällen wird von dieser Verlangsamung der Freisetzung aus den Behältern kein Kredit genommen.

Für eine erhöhte Restporosität wird der C-14-Transport in der Gasphase in den Rechnungen nicht betrachtet. Vorlaufende hydraulische Berechnungen haben ergeben,

³ Im Rahmen der VSG konnte diese Berücksichtigung, die mit erheblichen Eingriffen in den Rechencode TOUGH2 verbunden gewesen wäre, aus Zeitgründen nicht erfolgen.

dass mit einer Restporosität von 2 % die Lösungssättigung der südlichen Strecke des Einlagerungsfeldes Ost 12 erst nach ca. 80.000 Jahren ansteigt und damit weitere Lösung zu den Abfällen treten können. Deshalb kann eine Betrachtung der erhöhten Restporosität entfallen, da nach dieser Zeit für C-14 fast 14 Halbwertszeiten vergangen sind, so dass nahezu kein C-14 mehr vorhanden ist und ein Transport nach langen Zeiträumen nicht stattfinden kann. Der Transport von weiteren möglicherweise freigesetzten langlebigen Radionukliden in der flüssigen Phase, z. B. der für I-129, welches aufgrund der langen Halbwertszeit und der hohen Auswirkung auf die Dosis relevant ist, wird in Rechnungen mit MARNIE für die erhöhte Restporosität betrachtet.

Zusätzlich zu den in Kap. 4.4.1 und 4.4.2 genannten Annahmen und Parametern müssen zur Entwicklung von Rechenfällen weitere Eingabeparameter gewählt werden, die sich u. a. aus /BEU 12/ und weiteren Überlegungen ergeben. In den folgenden Kapiteln sind diese Überlegungen für die Rechenfälle, die sich aus dem Referenzszenarium sowie für die Rechenfälle, die sich aus den Alternativszenarien ergeben, beschrieben.

4.4.3.1 Referenzszenarium

Sofern nicht anders erwähnt, gelten alle folgenden Annahmen für die Rechnungen zur Einlagerungsvariante B1. Insgesamt sind für das Referenzszenarium laut /BEU 12/ vier initial defekte POLLUX[®]-10-Behälter anzunehmen. Die Aufteilung dieser Behälter auf die Einlagerungsstrecken ist in der Beschreibung des Szenariums /BEU 12/ nicht näher spezifiziert, dies sollte in zukünftigen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden. Für die vorliegenden Rechenfälle werden die unten stehenden Annahmen gemacht.

Aufgrund der Vielzahl an Ungewissheiten der Eingangsparameter werden zahlreiche Parametervariationen in den Rechenfällen betrachtet, einen sog. Referenzrechenfall gibt es aus diesem Grund nicht. Es wurde eine Vielzahl von Analysen durchgeführt, die zu einem Rechenfall führen, der als abdeckend eingeschätzt wird. Sofern nicht anders erwähnt, gelten alle folgenden Annahmen für die Einlagerungsvariante B1.

Rechenfälle für Brennelement-Behälter (Y1 – Y14)

Es wird, wie oben erwähnt, angenommen, dass die restlichen Brennelement-Behälter 500 Jahre lang gasdicht bleiben. Ab diesem Zeitpunkt wird die vollständige instantane

Freisetzung des volatilen C-14 Anteils angenommen. Dies ist in den Rechenfällen Y1 – Y14 berücksichtigt.

Im Ostflügel befinden sich 9 Einlagerungsfelder (Ost 4 bis Ost 12) mit POLLUX®-10 Behältern. Vereinfacht wird deshalb davon ausgegangen, dass im Einlagerungsfeld Ost 12 (s. Abb. 4.8) mit einer Wahrscheinlichkeit von $\frac{1}{9}$ ein initial defekter Behälter vorhanden ist. Diese Annahme wird als wahrscheinlich ($\frac{1}{9} > 0,1 \hat{=} 10\%$) eingestuft.

Um zu analysieren, welcher Freisetzungsort (welche Strecken in den Einlagerungsfeldern) die größte radiologische Konsequenz nach sich zieht, werden mehrere Rechenfälle abgeleitet, in welchen der Ort der Freisetzung von Radionukliden für einen defekten Behälter variiert wird. In Abb. 4.8 sind diese Orte abgebildet. Die entsprechenden Rechenfälle sind bezeichnet als Y1 – Y8 und in Abb. 4.8 sowie Tab. 4.20 dargestellt.

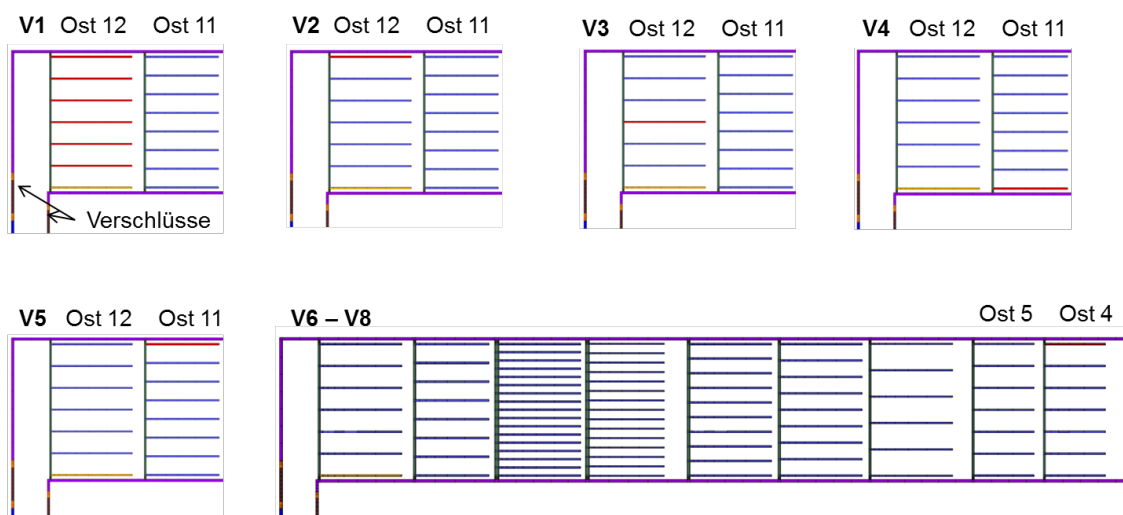


Abb. 4.8 Parametervariation des Freisetzungsorts für einen POLLUX®-10 Behälter

Freisetzungsorte in rot, der volatile IRF-Anteil eines Behälters wird freigesetzt in:

V1: im gesamtem Einlagerungsfeld 12, V2: nördl. Strecke des Feldes Ost 12, V3: mittl. Strecke des Feldes Ost 12, V4: südl. Strecke des Feldes Ost 11, V5: nördl. Strecke des Feldes Ost 11, V6: nördl. Strecke des Feldes Ost 4, V7: mittl. Strecke des Feldes Ost 4, V8: südl. Strecke des Feldes Ost 4.

Die Verteilung von zwei initial defekten Behältern in einem Feld wird als weniger wahrscheinlich erachtet ($\frac{1}{9} * \frac{1}{9} < 0,1 \hat{=} 10\%$), die Verteilung von drei initial defekten Behältern in einem Feld gilt als unwahrscheinlich ($\frac{1}{9} * \frac{1}{9} * \frac{1}{9} < 0,01 \hat{=} 1\%$).

Damit auf die Betrachtung aller möglichen Kombinationen der Positionierung der bis zu vier defekten Behältern verzichtet werden kann, soll ein abdeckender Rechenfall betrachtet werden. In diesem abdeckenden Rechenfall wird davon ausgegangen, dass sich in Feld Ost 12 ein initial defekter und im Nachbarfeld (Feld Ost 11) zwei initial defekte Brennelement-Behälter befinden (letzteres ist für sich bereits weniger wahrscheinlich⁴). Dieser abdeckende Rechenfall für die Ortsvariationen der initial defekten Behälter ist mit Y9 bezeichnet (Tab. 4.20).

Wie bereits in Kap. 4.4.1 erwähnt, werden unterschiedliche Korrosionsraten in den Rechenfällen berücksichtigt. Diese werden als Parametervariationen des Rechenfalls Y2 betrachtet (d. h. alle anderen Parameter sind exakt wie in Rechenfall Y2), da die Auswertung der Rechenfälle Y1 – Y8 ergibt, dass die Freisetzung von Radionukliden über die Streckenverschlüsse in diesem Fall (Y2) am höchsten ist. Die unterschiedlichen Korrosionsraten sind in den Rechenfällen Y10 – Y12 (Tab. 4.20) realisiert.

Wie in Kap. 4.4.2 beschrieben, wurden während der Laufzeit des Vorhabens die möglicherweise verfügbaren Wassermengen im Brennelemente-Behälter (POLLUX[®]-10) einer Prüfung und Aktualisierung (von 18 kg auf 60 g pro Behälter) /DÖR 12/ unterzogen. Um die Konsistenz zu früheren Rechnungen der Integritätsanalyse /KOC 12/ herzustellen, wird ein Rechenfall betrachtet, bei dem die Menge von 18 kg jeweils für jeden POLLUX[®]-10-Behälter zur Verfügung steht. Dieser weitere Rechenfall Y13 wird ebenfalls als Parametervariation des Rechenfalls Y2 berücksichtigt (Tab. 4.20). Ein weiterer Rechenfall (Y14) entsteht durch die Berücksichtigung der POLLUX[®]-9-Behälter im Einlagerungsfeld Ost 2 und Ost 3 (Materialgebiet EINL2, s. Anhang A.6)

⁴ Auch die Betrachtung aller möglichen vier Behälter (1 in Feld Ost 12 und 3 in Feld Ost 11) wäre hier abdeckend, dies wird im Kapitel 4.4.3.2 Alternativszenarien genutzt. Der Grund ist die einfache lineare Skalierbarkeit (bzgl. Rechenfälle Y1 – Y8) der Freisetzungsmenge am Behälter mit der berechneten Freisetzung am Streckenverschluss.

Tab. 4.20 Rechenfälle des Referenzszenariums für C-14 (Endlagerkonzept B1, 1 % Restporosität), Parametervariationen Teil 1

Name	Variierter Parameter	Korrosionsrate [µm/a]	Wassermenge* [kg]
Y1	Freisetzungsort V1	15	0,06
Y2	Freisetzungsort V2		
Y3	Freisetzungsort V3		
Y4	Freisetzungsort V4		
Y5	Freisetzungsort V5		
Y6	Freisetzungsort V6		
Y7	Freisetzungsort V7		
Y8	Freisetzungsort V8		
Y9	Freisetzungsort V2 (1 def. Behälter) und V4 (2 def. Behälter)		
Y10	Freisetzungsort V2, Korrosionsrate	5,1	
Y11	Freisetzungsort V2, Korrosionsrate	0,1	
Y12	Freisetzungsort V2, Korrosionsrate	0,04	
Y13	Restfeuchtigkeit	15	18
Y14	Behältertyp	15	13,6

* Wassermenge im Behälter pro Behälter, zur Korrosion wird die Lösungsmenge im Versatz hinzuaddiert.

Rechenfälle für Brennelementstrukturteil-Behälter (P1 – P9)

Das Endlagerkonzept sieht vor, die Brennelement-Strukturteile im Einlagerungsfeld Ost 12 einzulagern /BOL 12/, /BOL 11/. Eine Variation des Freisetzungsortes braucht in diesem Fall nicht vorgenommen zu werden, da nach /BOL 11/ vorgesehen ist, alle Abfälle in der südlichen Strecke des Einlagerungsfelds Ost 12 einzubringen. Analog zu den vorherigen Rechenfällen wird jedoch eine Variation der Korrosionsraten und der zu Verfügung stehenden Wassermengen vorgenommen (Rechenfälle P1 – P9 in Tab. 4.21). Um dem Optimierungsgedanken im Vorhaben Rechnung zu tragen, wird eine weitere Parametervariation durchgeführt, in der auch für die Behälter, in die Brennelemente-Strukturteile eingelagert werden, eine 500 Jahre andauernde Gasdichtheit postuliert wird (Rechenfall P10 in Tab. 4.21).

Tab. 4.21 Rechenfälle des Referenzszenariums für C-14 (Endlagerkonzept B1, 1 % Restporosität), Parametervariationen Teil 2

Name	Variierter Parameter	Korrosionsrate [µm/a]	Wassermenge*
P1	Korrosionsrate, Restfeuchte	15	18 kg für POLLUX- Behälter 1,91 kg für BE-Strukturteile
P2	Korrosionsrate, Restfeuchte	5,1	
P3	Korrosionsrate, Restfeuchte	0,1	
P4	Korrosionsrate, Restfeuchte	0,04	
P5	Korrosionsrate, Restfeuchte	keine	
P6	Korrosionsrate, Restfeuchte	15	0,06 kg für POLLUX- Behälter 1,91 kg für BE-Strukturteile
P7	Korrosionsrate, Restfeuchte	5,1	
P8	Korrosionsrate, Restfeuchte	0,1	
P9	Korrosionsrate, Restfeuchte	15	
P10	Optimierung, Behälter 500 a gasdicht, sonst wie P9	0,04	

* Wassermenge im Behälter pro Behälter, zur Korrosion wird die Lösungsmenge im Versatz hinzuaddiert.

Rechenfälle für die Einlagerungsvariante AB1 (U1 – U4)

Zur Ermittlung der Konsequenz aus der Option einer gemeinsamen Endlagerung von wärmeentwickelnden und nicht wärmeentwickelnden Abfällen werden für die Einlagerungsvariante AB1 ebenfalls Analysen durchgeführt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass zusätzlich im Westflügel aufgrund der unterstellten Abfallcharakteristika eine volatile IRF ausschließlich in den beiden nördlichen Strecken von Feld West 2 (EINL8, Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) zu betrachten ist. Für diese Berechnungen wird eine Variation der Korrosionsrate betrachtet (Rechenfälle U1 – U4 in Tab. 4.22). In diesen Rechenfällen wird der Westflügel einzeln betrachtet. Eine vollständig zusammenfassende Berechnung der höchsten Freisetzung aus den Rechenfällen Y2 und U1 wird im Rechenfall U5 betrachtet (Tab. 4.22).

Tab. 4.22 Rechenfälle des Referenzszenariums für C-14, Parametervariationen Teil 3

Name	Endlager-konzept	Variierter Parameter	Korrosions-rate [$\mu\text{m/a}$]	Wasser-menge* [kg]	Restpo-rosität []
U1	AB1	Korrosionsrate, nur Westflügel	15	506**	0,25
U2		Korrosionsrate	5,1	506**	0,25
U3		Korrosionsrate, nur Westflügel	0,1	506**	0,25
U4		Korrosionsrate, nur Westflügel	0,04	506**	0,25
U5		Westflügel	15	506**	0,25
		Ostflügel	15	0,06	0,01

* Wassermenge im Behälter pro Behälter, zur Korrosion wird die Lösungsmenge im Versatz hinzu ad-diert.

** Zur Verfügung stehende Wassermengen der Behälter im Westflügel (s. /FRI 12/)

Rechenfälle für das Isotop I-129

Zur vollständigen Betrachtung des volatilen Radionuklidtransports insbesondere für lange Zeiträume werden zusätzlich Analysen für das Radionuklid I-129 durchgeführt. Diese Betrachtung führt zu insgesamt vier Rechenfällen. Es werden wieder jeweils die unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Restfeuchtemengen der Behälter betrach-tet (M1 und M2 in Tab. 4.23). Um den Effekt der Gasdiffusion zu untersuchen, wird in den Rechenfällen M3 und M4 (Tab. 4.23) die Diffusion „ausgeschaltet“.

Tab. 4.23 Rechenfälle des Referenzszenariums für I-129, Parametervariationen Teil 4

Name	Endlager-konzept	Variierter Parameter	Korrosions-rate [$\mu\text{m/a}$]	Wasser-menge* [kg]	Restpo-rosität []
M1	B1	Restfeuchtigkeit	15	0,06	0,01
M2		Restfeuchtigkeit		18	
M3		Ohne Diffusion, sonst wie M1		0,06	
M4		Ohne Diffusion, sonst wie M2		18	

4.4.3.2 Alternativszenarien

Rechenfälle für Brennelement-Behälter (Y-Z1 – Y-Z8)

Falls nicht explizit erwähnt, gelten die folgenden Annahmen für die Variante B1. Analog zum Referenzszenarium muss auch für die Alternativszenarien der Freisetzungsort aus den initial defekten Behältern näher betrachtet werden. Wie bereits für das Referenzszenarium beschrieben, ist die Verteilung von zwei initial defekten Behältern in einem Feld weniger wahrscheinlich. Dieser Fall wird als Alternativszenarium im Rechenfall Y-Z1 (s. Tab.4.24) betrachtet, in welchem zwei initial defekte POLLUX[®]-10-Behälter im Feld Ost 12 postuliert werden. Da sich aus den Rechenfällen des Referenzszenariums (s. Kap. 5.2.1) am Ort V2 (s. Abb. 4.8 und Tab. 4.20) die höchste Freisetzung ergibt, wird für zwei initial defekte Behälter in Feld Ost 12 keine weitere Variation des Freisetzungsortes vorgenommen und es werden beide initial defekten Behälter am Ort V2 angenommen. Die wesentlichen Parameter dieses und der folgenden Rechenfälle sind in Tab. 4.24 aufgelistet.

Analog zu den Rechenfällen des Referenzszenariums wird, um die Anzahl der Rechenfälle zu minimieren, ein abdeckender Rechenfall betrachtet. So braucht für die vielen weiteren theoretisch möglichen Verteilungen der initial defekten POLLUX[®]-10-Behälter keine Ermittlung der Häufigkeitsverteilung an verschiedenen Orten stattzufinden. Für diese abdeckenden Rechenfälle wird angenommen, dass sich ein initial defekter Behälter am Ort V2 in Feld Ost 12 befindet und drei weitere initial defekte Brennelemente-Behälter in Feld 11 am Ort V4 (Rechenfall Y-Z2) und V5 (Rechenfall Y-Z3). Diese Verteilung der drei initial defekten Behälter ist für sich bereits unwahrscheinlich und bedeutet eine äußerst konservative Betrachtung der Radionuklidfreisetzung aus den Einlagefeldern Ost 12 und Ost 11.

Tab. 4.24 Rechenfälle der Alternativszenarien für C-14, Parametervariationen Teil 1

Name	Endlager-konzept	Variierter Parameter	Korrosions-rate [$\mu\text{m/a}$]	Wasser-menge* [kg]	Restporo-sität []
Y-Z1	B1	Freisetzungsort V2; (2 def. Behälter)	15	0,06	0,01
Y-Z2		Freisetzungsort V2; (1 def. Behälter) und V4 (3 def. Behälter)			
Y-Z3		Freisetzungsort V2; (1 def. Behälter) und V5 (3 def. Behälter)			
Y-Z4		Freisetzungsort V2; (6 def. Behälter)			
Y-Z5		Streckenverschluss-versagen Ost; sonst wie Y2			
Y-Z6		Streckenverschluss-versagen Mitte; sonst wie Y2			
Y-Z7		Schachtverschluss-versagen; sonst wie Y2			
Y-Z8		Korrosionsrate; sonst wie Y2	100		

* Wassermenge im Behälter pro Behälter, zur Korrosion wird die Lösungsmenge im Versatz hinzuaddiert.

Nach /BEU 12/ muss bei den Alternativszenarien davon ausgegangen werden, dass insgesamt nicht vier sondern sechs Brennelement-Behälter initial defekt eingelagert werden. Um die Anzahl der Rechenfälle zu minimieren, wird folgender abdeckender Rechenfall betrachtet: Alle Behälter befinden sich in einer Einlagerungsstrecke (Ort: V2) in Feld Ost 12 (Rechenfall Y-Z4). Diese statistisch unwahrscheinliche Annahme ist analog zu den vorigen Annahmen extrem pessimistisch in Bezug auf die Freisetzung von Radionukliden an den Streckenverschlüssen.

Zusätzlich zu den obigen Fällen werden in /BEU 12/ Alternativszenarien zum vorzeitigen *Schacht-* bzw. *Streckenverschlussversagen* (Szenarien A1w1 und A1w2) definiert. Aus diesen Szenarien werden insgesamt sechs Rechenfälle entwickelt.

Für den Rechenfall Y2, der die höchste Freisetzung volatiler Radionuklide für die Berechnungen der POLLUX Behälter aufweist, wird das vorzeitige (im Rechenfall zum

Zeitpunkt Null, also mit Beginn der Nachverschlussphase) Versagen eines Streckenverschlusses betrachtet und die Ausfälle für die verschiedenen Streckenverschlüsse variiert: Im Rechenfall Y-Z5 (Tab. 4.24) wird das vorzeitige Versagen des östlichen, im Rechenfall Y-Z6 (Tab. 4.24) das vorzeitige Versagen des mittleren Streckenverschlusses angenommen. Die integrale Permeabilität des gesamten Verschlussbauwerks im Schacht wird jeweils mit $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ angesetzt.

Für den Rechenfall des Alternativszenariums *vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses* Y-Z7 (Tab. 4.24) wird die integrale Permeabilität aller Dichtelemente (auch der vorkompaktierten Salzdichtung) beider Schachtverschlüsse auf $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ gesetzt.

Rechenfälle für Brennelement-Strukturteil-Behälter (P-Z1 – P-Z5)

Für den Rechenfall P9, der die höchste Freisetzung von volatilen Radionukliden für die Berechnungen der Brennelement-Strukturteil-Behälter zeigt, wird das vorzeitige (im Rechenfall zum Zeitpunkt Null, also mit Beginn der Nachverschlussphase) Versagen der Streckenverschlüsse für jeden Streckenverschluss ebenfalls einzeln betrachtet. Es entstehen die Rechenfälle P-Z1 (Streckenverschluss Ost), P-Z2 (Streckenverschluss West) und P-Z3 (Schachtverschluss), dargestellt in Tab. 4.25. Auch hier wird die integrale Permeabilität aller Dichtelemente jeweils auf $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ gesetzt.

Tab. 4.25 Rechenfälle der Alternativszenarien für C-14, Parametervariationen Teil 2

Name	Endlagerkonzept	Variierter Parameter	Korrosionsrate [$\mu\text{m/a}$]	Wassermenge* [kg]	Restporosität []
P-Z1	B1	Streckenverschlussversagen Ost; sonst wie P9	0,04	1,91	0,01
P-Z2		Streckenverschlussversagen Mitte; sonst wie P9	0,04		
P-Z3		Schachtverschlussversagen; sonst wie P9	0,04		
P-Z4		Korrosionsrate, sonst wie P9	0,04		
P-Z5		Gasdichtheit 500 a, sonst wie P-Z1	0,04		

* Wassermenge im Behälter pro Behälter, zur Korrosion wird die Lösungsmenge im Versatz hinzu addiert.

Rechenfälle für die Einlagerungsvariante AB1 (U-Z1 – UZ6)

Für die Einlagerungsvariante AB1 müssen ebenfalls die Alternativszenarien A1w1 und A1w2 (aus /BEU 12/) betrachtet werden. Dies wurde auf Basis des Rechenfalls U5 durchgeführt: Diese Betrachtungen münden in fünf Rechenfälle (s. Tab. 4.26): Vorzeitiges Versagen der Streckenverschlüsse Ost (U-Z1), Mitte (U-Z2), West (U-Z3) und Nord (U-Z4) sowie vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses (U-Z5).

Wie in Kap. 4.4.1 beschrieben, wird ebenfalls eine sehr hohe Korrosionsrate (100 $\mu\text{m/a}$) als weniger wahrscheinlich postuliert. Es entstehen daraus drei weitere Rechenfälle: Y-Z8 (s. Tab. 4.24), P-Z4 (s. Tab. 4.25) und U-Z6 (s. Tab. 4.26).

Tab. 4.26 Rechenfälle der Alternativszenarien für C-14, Parametervariationen Teil 3

Name	Endlager-konzept	Variierter Parameter	Korrosions-rate [$\mu\text{m/a}$]	Wasser-menge* [kg]	Restpo-si-tät []
U-Z1	AB1	Streckenver-schlussversagen Ost; sonst wie U5	15	506**	0,25
				0,06	0,01
U-Z2		Streckenver-schlussversagen Mitte; sonst wie U5		506**	0,25
				0,06	0,01
U-Z3		Streckenver-schlussversagen West; sonst wie U5		506**	0,25
				0,06	0,01
U-Z4		Streckenver-schlussversagen Nord; sonst wie U5		506**	0,25
				0,06	0,01
U-Z5		Schachtver-schlussversagen; sonst wie U5		506**	0,25
				0,06	0,01
U-Z6	Korrosionsrate; sonst wie U5	100	506**	0,25	
			0,06	0,01	

* Wassermenge im Behälter pro Behälter, zur Korrosion wird die Lösungsmenge im Versatz hinzu ad-diert.

** Zur Verfügung stehende Wassermengen der Behälter im Westflügel (s. /FRI 12/)

4.4.3.3 What-if-Rechnungen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, liegen für zahlreiche Parameter und Prozesse nur Daten und Abschätzungen mit einer großen Ungewissheit vor (z. B. Korrosionsraten, Freisetzung der Radionuklide aus den Behältern etc.). Vor diesem

Hintergrund wird auf die Definition von What-if-Rechenfällen, die unwahrscheinliche Entwicklungen oder unwahrscheinliche Ausprägungen von Entwicklungen behandeln sollen, verzichtet. Die Ungewissheiten sowohl in der Annahme bzw. Vereinfachung von Prozessabläufen in den Modellen als auch der Abschätzung der verwendeten Parameter in den Rechnungen sind schwer zu quantifizieren. Diese Ungewissheiten bzgl. der Prozessabläufe, der physikalischen Beschreibung der Abläufe und Zusammenhänge sowie die modellmäßige Beschreibung wurden soweit begründbar mit konservativen Ansätzen begegnet. Diese Ansätze schließen unseres Erachtens auch die What-if-Bereiche ein.

5 Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse

Im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse werden neben den Rechnungen zum Referenzszenarium und den Alternativszenarien umfangreiche deterministische Analysen zu den Ungewissheiten durchgeführt, in denen die Parameter und Datenbandbreiten variiert und deren Einfluss auf das Rechenergebnis untersucht werden. Es wurden weitaus mehr Rechnungen durchgeführt, als nachfolgend beschrieben werden. Allein aus den im Detail ausgewerteten Ergebnissen der deterministischen Analysen der Daten- und Parametervariationen konnte ausgewiesen werden, dass sowohl für das Referenzszenarium als auch für die Alternativszenarien die errechnete Konsequenz die Bewertungsgrößen um Größenordnungen unterschreitet. Hieraus wird abgeleitet, dass eine probabilistische Unsicherheitsanalyse nicht durchzuführen ist, da sie keine weiteren Erkenntnisse zur Bewertung der Ergebnisse liefern kann.

Im Fall der TOUGH2-Rechnungen für den Gaspfad sind die Ungewissheiten sowohl in der Annahme bzw. Vereinfachung von Prozessabläufen in den Modellen als auch in der Abschätzung der verwendeten Zweiphasenfluss-Parameter in den Rechnungen schwer zu quantifizieren. Die in den Zweiphasenflussrechnungen verwendeten Modellannahmen führen zu einer Überschätzung des aus dem Endlager strömenden Gases und zu einer erhöhten Radionuklidfreisetzung über den Gaspfad. Parameterungewissheiten werden in den Rechenfällen des Referenzszenariums und der Alternativszenarien betrachtet. Eine weiterführende Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse liefert aufgrund der vereinfachten z. T. pessimistischen Modellannahmen zum Quellterm des volatilen Anteils der IRF keine realistischen Aussagen zur Gesamtunsicherheit bezüglich des Gastransportes.

5.1 Rechenfälle MARNIE (Einphasentransport)

Im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse wurde eine Vielzahl von Rechnungen u. a. zum Systemverständnis aber auch zur Definition von abdeckenden Parameterkombinationen zur deterministischen Analyse durchgeführt, auf deren Auflistung hier verzichtet wird.

In den nachfolgenden Kapiteln werden für die auf Basis der aus der Szenarientwicklung und dem Schema der Ableitung der Rechenfälle (Storyboard) in Kap. 2.2 definierten Rechenfälle die radiologischen Konsequenzen aus der Freisetzung von Radionuk-

liden über den Lösungspfad beschrieben. Zur Auswertung der betrachteten Rechenfälle wird der in Kap. 2.1 definierte RGI (Radiologischer Geringfügigkeitsindex) herangezogen. In den folgenden Kapiteln werden als Ergebnisse der Analysen Aktivitätsströme über die Streckenverschlüsse dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die an den Streckenverschlüssen ermittelten Aktivitätsströme für die Szenarien und die Parametervariationen Werte kleiner 10^{-5} Bq/a aufweisen, was einem Zerfall in 100.000 Jahren entspricht. Sie stellen fiktive Rechengrößen dar und dienen ausschließlich dem Prozessverständnis. Zusammenfassend und in Würdigung der Ergebnisse der Analysen wird die radiologische Konsequenz mittels RGI deshalb nur im Kap. 6.1 dargestellt.

Im Rahmen der Rechnungen zur radiologischen Konsequenzenanalyse werden weiterhin umfangreiche deterministische Analysen zu den Ungewissheiten durchgeführt, in denen die Parameter und Datenbandbreiten variiert und deren Einfluss auf das Rechenergebnis untersucht werden.

5.1.1 Ergebnisse der Rechenfälle zum Referenzszenarium

Die folgenden Beschreibungen der Ergebnisse der radiologischen Konsequenzen beziehen sich auf das Referenzszenarium /BEU 12/. Auf dieser Basis wird eine Betrachtung von Ungewissheiten bei der Parameterwahl durchgeführt. Auf eine probabilistische Vorgehensweise wird bewusst verzichtet, weil einerseits durch die Vorgabe von wahrscheinlichen bzw. weniger wahrscheinlichen FEP-Ausprägungen im FEP-Katalog auf die Angabe von Wahrscheinlichkeitsdichten verzichtet wurde und andererseits, wie schon beschrieben, deterministische Unsicherheitsbetrachtungen die Notwendigkeit von probabilistischen Analysen nicht anzeigen.

5.1.1.1 Rechenfall R1

Für das Referenzszenarium wird im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse auf Grundlage von /POP 12/ als Prämisse von einer Restporosität von 1 % in allen mit Salzgrus versetzten Strecken ausgegangen, diese wird bei der schnellen Kompaktion in den nach dem Kompaktionsansatz „trocken, kalt“ berechneten Strecken (Abb. 4.5) spätestens nach 6.000 Jahren erreicht. Der der Kompaktion entgegenwirkende Druck der eingeschlossenen Luftmenge wird bei der Berechnung, wie in Kap. 4.3.1 beschrieben, berücksichtigt.

Alle Einlagerungsstrecken im Ostflügel, die aufgrund der Einlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle nach dem Kompaktionsansatz „trocken, heiß“ behandelt werden (Abb. 4.5), erreichen diese Restporosität bereits ca. 100 Jahre nach dem für die Modellrechnungen festgelegten Kompaktionsbeginn (Verfüllung des Einlagerungsfeldes). In den Richtstrecken Nord und Süd, die direkt an wärmeentwickelnde Einlagerungsstrecken (Kompaktionsansatz „feucht, warm“, Abb. 4.5) angrenzen, wird diese Restporosität nach ca. 160 Jahren, in den Richtstrecken, die keiner oder nur sehr geringer Wärmezufuhr ausgesetzt sind (Kompaktionsansatz „feucht, kalt“, Abb. 4.5) nach ca. 250 Jahren erreicht. In den Querschlägen und den Einlagerungsstrecken mit Abfällen, die eine geringere Wärmeentwicklung besitzen (Kompaktionsansatz „trocken, warm“, Abb. 4.5), ist der Salzgrusversatz bis zur Restporosität nach ca. 615 Jahren und in den Strecken, die trocken versetzt sind und vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ausgesetzt sind, nach ca. 6.000 Jahren kompaktiert. Abb. 5.1 zeigt den Porositätsverlauf für die entsprechenden Strecken im Endlager als Ergebnis der MARNIE-Simulation für den Rechenfall R1 im Zeitraum bis 2.000 Jahre.

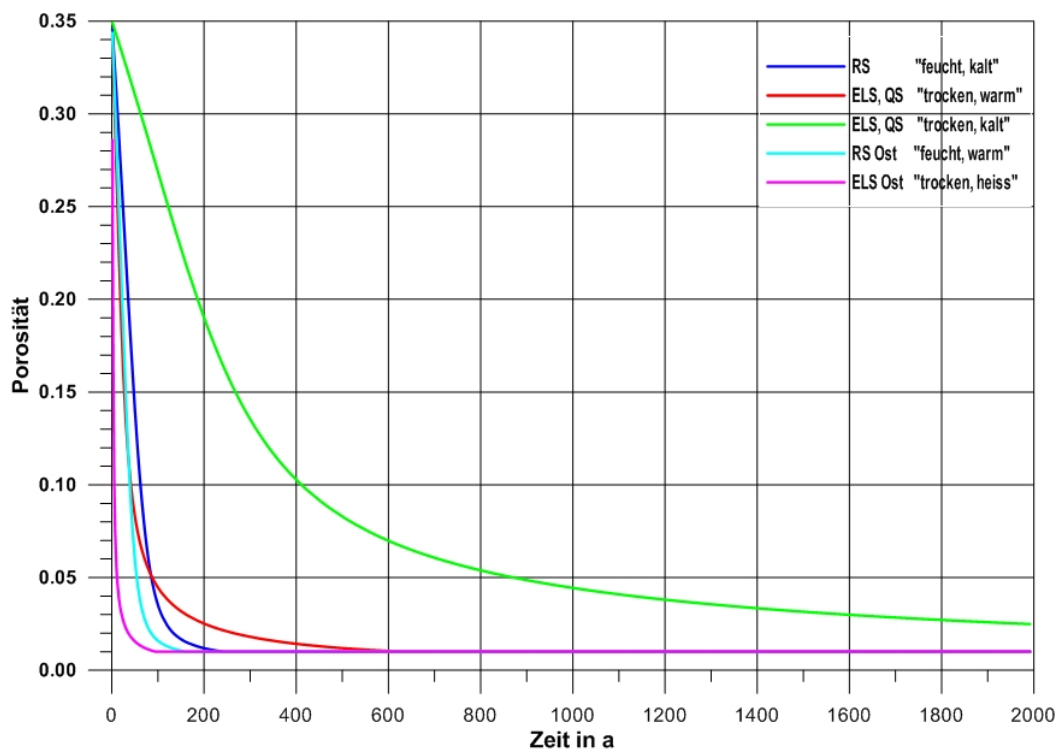


Abb. 5.1 Entwicklung der Porosität des Salzgrusversatzes in einzelnen Strecken in Abhängigkeit von Feuchtegrad und Wärmeeintrag bei schneller Kompaktion

RS = Richtstrecke, ELS = Einlagerungsstrecke, QS = Querschläge, Ost = Ostflügel.

Nach dem Ende der auslegungsbedingten Funktionsdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse von 50.000 Jahren vergrößert sich aufgrund der erhöhten integralen Permeabilität der Dichtelemente der Schachtverschlüsse der über die Schächte zutretende Lösungsstrom, so dass der Infrastrukturbereich und die angrenzenden Streckenverschlüsse, welche zu diesem Zeitpunkt ebenfalls eine erhöhte integrale Permeabilität von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ besitzen, innerhalb von weniger als 1.000 Jahren nach Ende der Funktionsdauer mit Lösung gefüllt werden. Zu diesem Zeitpunkt haben die angrenzenden Richtstrecken durch die Salzgruskompaktion bereits die Restporosität von 1 % erreicht. Wie in Kap. 4.3.1 ausgeführt, liegen laut /POP 12/ bei dieser Porosität keine zusammenhängenden Porenräume mehr vor, d. h., Advektion von Lösung kann nicht mehr stattfinden. Aus rechentechnischen Gründen muss dem Programm MARNIE jedoch eine endliche Permeabilität zugewiesen werden, deshalb wird die Permeabilität für den auf 1 % Restporosität kompaktierten Salzgrusversatz auf 10^{-22} m^2 gesetzt.

Durch die Anbindung an das Deckgebirge steht an den Streckenverschlüssen ein hydrostatischer Druck an, der gegenüber den nicht vollständig lösungsgefüllten Richtstrecken zu einem erheblichen Druckgradienten führt. Deshalb wird ein geringer Lösungsstrom in das Endlagerbergwerk hinein berechnet. Dieser rechnerisch ermittelte geringfügige Lösungsfluss füllt innerhalb des Betrachtungszeitraums von $1 \cdot 10^6$ Jahren lediglich den noch vorhandenen Porenraum in den an die Streckenverschlüsse Ost, Mitte und West angrenzenden Richtstrecken vollständig (Zeitdauer ca. 350.000 Jahre). Abb. 5.2 zeigt die Lösungssättigung der Strecken des konzipierten Endlagerbergwerks nach $1 \cdot 10^6$ Jahren in verschiedenen Sättigungsstufen.

Hohlräume, die durch den geringen Zufluss von Lösungen aus dem Infrastrukturbereich eine volle Lösungssättigung erreicht haben, werden in Abb. 5.2 durch die Farbe dunkel-magenta gekennzeichnet. Dadurch wird der Unterschied zu den rot gefärbten Richtstrecken, die ausschließlich durch die künstliche Anfeuchtung des Versatzes in den Richtstrecken bei Erreichen der Restporosität von 1 % zu ca. 97 % lösungsgesättigt sind, erkennbar. Da die Lösung weder in den trockenen Salzgrusversatz der Querschläge noch in den der Einlagerungstrecken vordringt, kann eine Freisetzung von Radionukliden in die wässrige Lösung nicht erfolgen. Dies führt schließlich hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase zu einer Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem RGI = 0 (vollständiger Einschluss der Radionuklide).

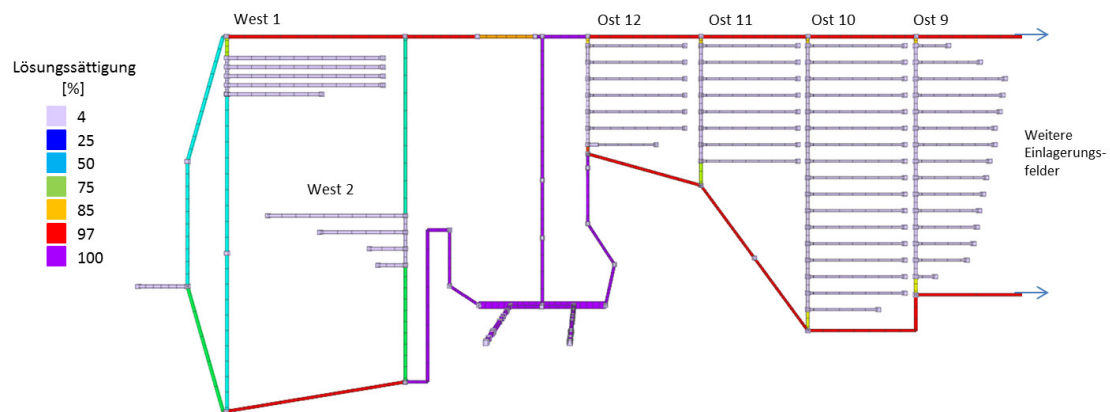


Abb. 5.2 Lösungssättigung der Strecken im Rechenfall R1 zum Referenzszenarium nach $1 \cdot 10^6$ Jahren

5.1.1.2 Parametervariationen auf Basis des Referenzszenariums

Parametervariation des Referenzszenariums: Rechenfall PV-R1

Im Rechenfall PV-R1 wird für die Kompaktionsgeschwindigkeit des Salzgrusversatzes als Parametervariation die „langsame“ Kompaktion angenommen, um die Konsequenz der Ungewissheit bezüglich der Kriechklassen der Salzgruskompaktion (s. Kap. 4.2.3) zu analysieren. Die Ergebnisse sind bezüglich der Lösungssättigung der Strecken mit denen des Rechenfalls R1 identisch, lediglich die Zeiträume zum Erreichen der Restporosität sind unterschiedlich.

Die Restporosität von 1 % wird nach spätestens 7.300 Jahren in allen mit Salzgrus versetzten Strecken erreicht. Der Versatz der Einlagerungsstrecken im Ostflügel, die aufgrund der Einlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle nach dem Kompaktionsansatz „trocken, heiß“ behandelt werden (Abb. 4.5), erreicht die Restporosität nach ca. 440 Jahren. In den Richtstrecken Nord und Süd, die direkt an wärmeentwickelnde Einlagerungsstrecken angrenzen („feucht, warm“) wird dies nach ca. 310 Jahren und in den Richtstrecken Nord und Süd, die keiner oder nur sehr geringer Wärmezufuhr ausgesetzt sind („feucht, kalt“), nach ca. 610 Jahren erreicht. Der Salzgrusversatz in den Querschlägen und in den Einlagerungsstrecken mit Abfällen, die eine geringere Wärmeentwicklung haben („trocken, warm“) ist nach ca. 1.500 Jahren und in den Strecken, die trocken versetzt sind und einer vernachlässigbaren Wärmeentwicklung ausgesetzt sind, nach ca. 7.300 Jahren bis zur Restporosität von 1 % kompaktiert. Abb. 5.3 zeigt

als Ergebnis des Rechenfalls die Porositätsentwicklung des Salzgrusversatzes in den unterschiedlichen Strecken im Zeitraum bis 2.000 Jahre.

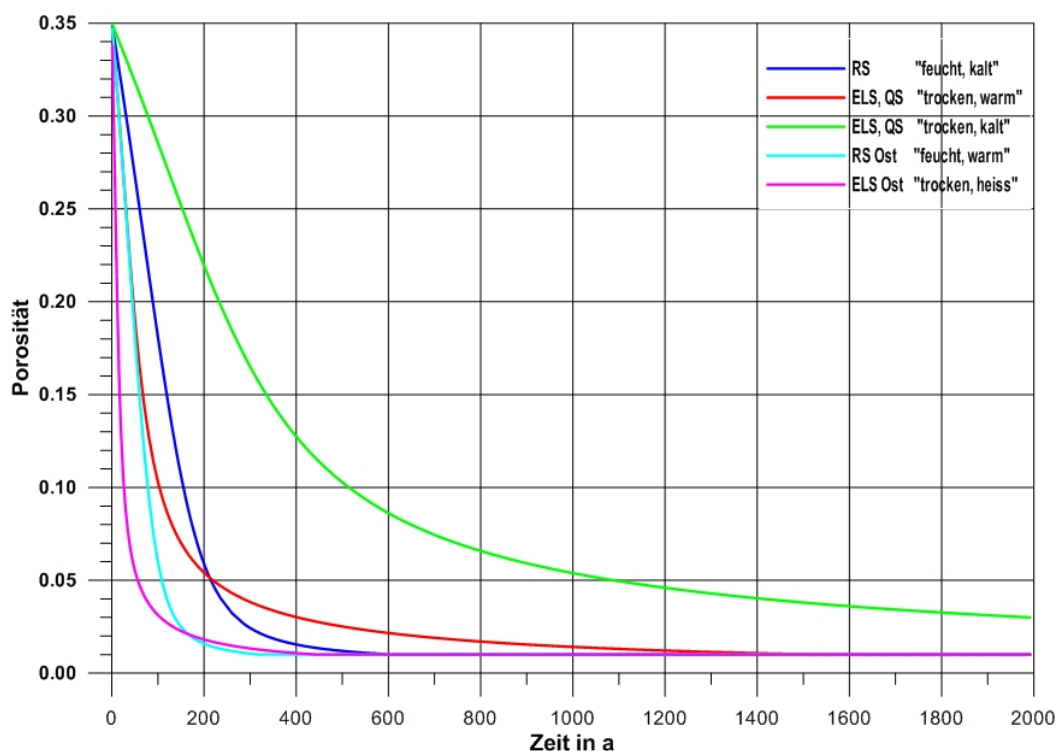


Abb. 5.3 Entwicklung der Porosität des Salzgrusversatzes im Rechenfall PV-R1 in einzelnen Strecken in Abhängigkeit vom Feuchtegrad und Wärmeeintrag bei langsamer Kompaktion

RS = Richtstrecke, ELS = Einlagerungsstrecke, QS = Querschläge, Ost = Ostflügel.

Auch in diesem Rechenfall haben die an den Infrastrukturbereich angrenzenden Richtstrecken bereits die Restporosität von 1 %, bei der keine nennenswerte Advektion mehr stattfindet, erreicht, bevor der Infrastrukturbereich lösungsgesättigt ist und sich infrastrukturbereichsseitig ein hydraulischer Druck auf die Streckenverschlüsse aufbauen kann. Dies bedeutet, dass alle für den Rechenfall R1 zum Referenzszenarium getroffenen Aussagen bezüglich des rechentechnisch bedingten Erreichens der Lösungssättigung der einzelnen Strecken hier ebenfalls gelten. Auch die Lösungssättigung nach $1 \cdot 10^6$ Jahren ist identisch zum Rechenfall R1 und entspricht daher der in Abb. 5.2 gezeigten. Da die Lösung weder in die Querschläge noch in die Einlagerungsstrecken vordringt, erfolgt keine Freisetzung von Radionukliden in die Lösungsphase. Dies führt zu einer Null-Freisetzung gelöster Radionuklide über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem RGI = 0.

Parametervariationen des Referenzszenariums: Rechenfälle PV-R2 und PV-R3

In diesen Rechenfällen wird als Parametervariation für die Einlagerungsvariante B1 eine Restporosität von 2 % mit einer nicht vernachlässigbaren Advektion – aufgrund der nach der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung aus Kap. 3.3.2 berechneten Permeabilität von $7,3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ – unterstellt. Im Rechenfall PV-R2 wird als Kompaktionsgeschwindigkeit die „schnelle“, im Rechenfall PV-R3 die „langsame“ Kompaktion angenommen. Weil die Ergebnisse nahezu identisch sind, wird hier das Ergebnis des im Hinblick auf die Kompaktionsgeschwindigkeit pessimistischeren Rechenfalls PV-R3 beschrieben. Da das in diesem Rechenfall beobachtete Prozessverhalten in Bezug auf den Einstrom von Lösungen und den Radionuklidtransport für viele der durchgeführten Rechenfälle gilt, erfolgt hier eine ausführliche Beschreibung.

Nach den Ergebnissen dieses Rechenfalls hat der Salzgrusversatz in den an den Infrastrukturbereich angrenzenden Richtstrecken bereits die Restporosität von 2 % erreicht, bevor der Infrastrukturbereich lösungsgesättigt ist und sich ein hydraulischer Druck an den Streckenverschlüssen aufbauen kann. Der verstärkte Einstrom in den Infrastrukturbereich des Endlagers beginnt nach 50.000 Jahren (Funktionsdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse). Innerhalb von weniger als 1.000 Jahren baut sich ein hydraulischer Druck durch die Verbindung mit dem Deckgebirge auf. Der an den Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel angrenzende 1. Abschnitt der Richtstrecke Süd bis zum Abzweig des Querschlag zum Feld Ost 12 (Abb. 4.1) füllt sich anschließend innerhalb weniger Dekaden, der angrenzende Querschlag in Feld Ost 12 innerhalb von ca. 200 Jahren. Die südlichste Einlagerungsstrecke im Feld Ost 12 für die Strukturteile ist ca. 2.500 Jahre nach dem Ausfall der Schachtverschlüsse (Ende der Funktionsdauer) mit Lösung gefüllt. Anschließend erfolgt sukzessive die Lösungssättigung weiterer Richtstrecken, Querschläge und Einlagerungsstrecken im Ostflügel sowohl über den Streckenverschluss Ost als auch über den Streckenverschluss Mitte.

Nach Ende des Bewertungszeitraums von $1 \cdot 10^6$ Jahren sind die Einlagerungsfelder Ost 12 bis Ost 7 vollständig lösungsgesättigt. Abb. 5.4 zeigt die Lösungssättigung aller Strecken im Endlager nach $1 \cdot 10^6$ Jahren. Da einige Einlagerungsfelder im Ostflügel noch nicht gefüllt sind, ist der Einstrom in das Endlager auch nach $1 \cdot 10^6$ Jahren noch nicht beendet. Rechnungen mit einem längeren Simulationszeitraum zeigen, dass (bei Unterstellung von sich auch über diesen Zeitraum nicht ändernden Randbedingungen) das gesamte Endlagerbergwerk rechnerisch erst nach ca. $3 \cdot 10^6$ Jahren lösungsgesät-

tigt ist. Bis zu diesem Zeitpunkt werden die aus den Einlagerungsfeldern freigesetzten Radionuklide mit den geringen einströmenden Lösungen advektiv und auch diffusiv sowohl über die Richtstrecke Süd als auch über die Richtstrecke Nord in Richtung der noch nicht lösungsgefüllten Bereiche transportiert. Aufgrund von Diffusionsvorgängen erfolgt rein rechenstechnisch ein sehr geringer ($< 10^{-5}$ Bq/a) Radionuklidtransport über den Streckenverschluss Ost gegen den Lösungseinstrom in Richtung des Infrastrukturbereichs.

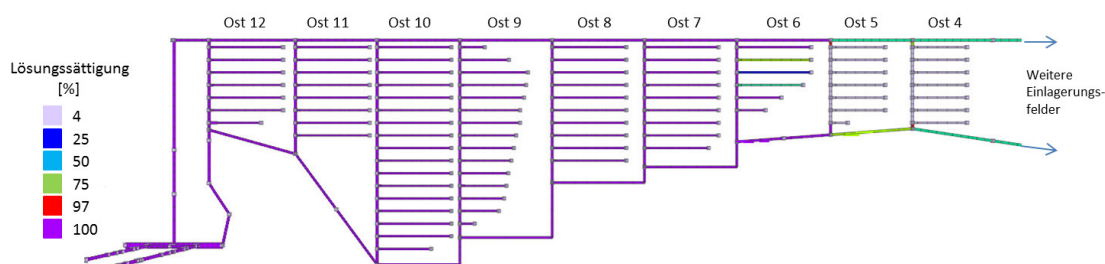


Abb. 5.4 Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Rechenfall PV-R3

Abb. 5.5 zeigt die Aktivitätsströme der für die Berechnung des RGI relevanten Radionuklide über den Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) in Richtung Infrastrukturbereich. Die dargestellten real vernachlässigbaren Aktivitätsströme ($< 10^{-5}$ Bq/a) dienen als reine Rechengrößen zur Darstellung der Prozessabläufe in den Modellrechnungen.

Die Aktivitätsströme über den Streckenverschluss Mitte (Abb. 4.1) sind nochmals um mehrere Größenordnungen geringer und werden deshalb in Abb. 5.5 nicht dargestellt. Die unterschiedliche Höhe der Aktivitätsströme an den Streckenverschlüssen ist durch den ausschließlich diffusiven Radionuklidtransport begründet, der durch den Konzentrationsgradienten bestimmt wird. Aufgrund seines großen Porenvolumens hat der lösungs gesättigte Infrastrukturbereich ein hohes Verdünnungspotential, so dass die Diffusionsströme in seiner Nähe zunehmen. Der Transportweg für die freigesetzten Radionuklide vom Abzweig des Einlagerungsfeldes Ost 12 über die nördliche Richtstrecke zum Streckenverschluss Mitte am Infrastrukturbereich ist sehr viel länger als über den sehr kurzen Abschnitt der Richtstrecke Süd vom Anschluss des Feldes Ost 12 zu dem direkt daran angrenzenden Streckenverschluss Ost, so dass der diffusive Radionuklidtransport in Richtung dieses Streckenverschlusses schneller erfolgen kann. Zusätzlich bewirkt dieser erhöhte diffusive Transport der Radionuklide, dass ein größerer Anteil der in der südlichsten Einlagerungsstrecke des Feldes Ost 12

(Abb. 3.1) freigesetzten Radionuklide – diese Strecke ist für die Einlagerung von Brennelementstrukturteilen vorgesehen – diffusiv Richtung Süden transportiert wird, während ein kleinerer Anteil advektiv mit dem andauernden geringem Lösungseinstrom Richtung Norden transportiert werden. Auch ein kleiner Anteil der in der Einlagerungsstrecke Ost 12.6 freigesetzten Aktivität, – hier werden POLLUX[®]-10-Behälter mit abgebrannten Brennelementen eingelagert – gelangt so diffusiv in Richtung südliche Richtstrecke, wohingegen die Radionuklide aus den Einlagerungsstrecken Ost 12.1 bis Ost 12.5, die ebenfalls POLLUX[®]-10-Behälter enthalten, mit dem Lösungseinstrom in Richtung Norden transportiert werden. Am Übergang vom Querschlag zur Richtstrecke Süd wird die Aktivität mit dem Lösungseinstrom in die Richtstrecke Süd in Richtung der nicht lösungsgesättigten Einlagerungsfelder transportiert. Deshalb gelangt nur ein vernachlässigbarer Anteil der freigesetzten Aktivität bis zum Streckenverschluss Ost.

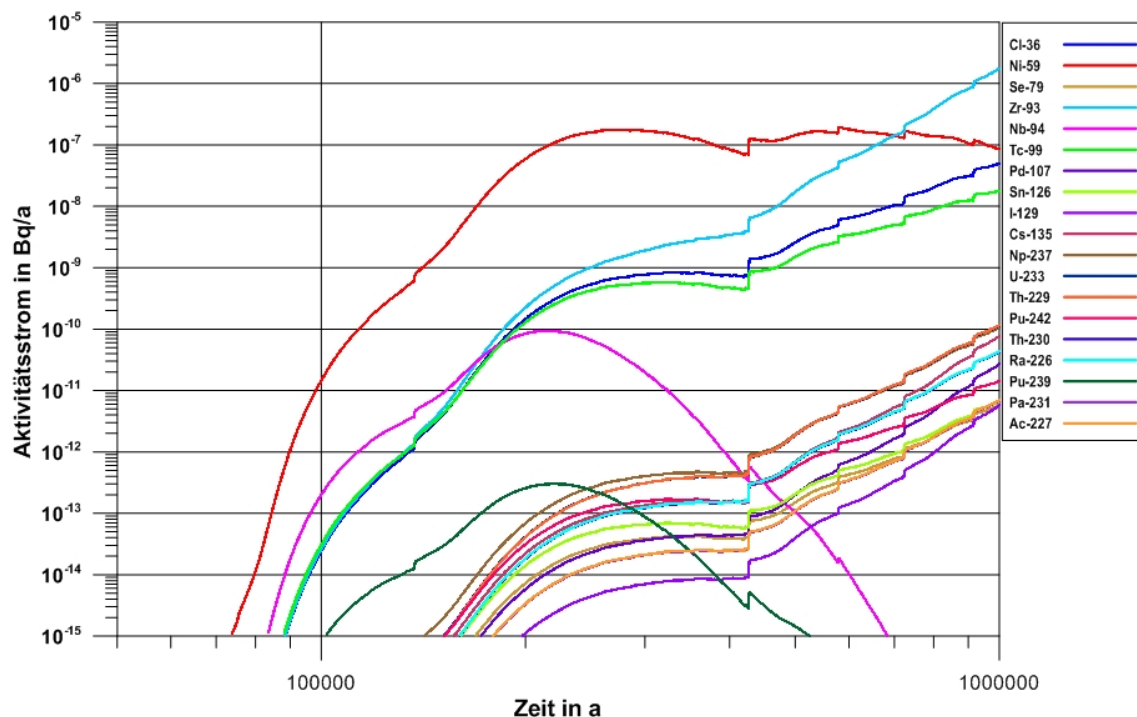


Abb. 5.5 Aktivitätsströme der für die Berechnung des RGI relevanten Radionuklide am Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) im Rechenfall PV-R3

Alle berechneten radionuklidspezifischen Aktivitätsströme sind vernachlässigbar gering. Die nachfolgende Prozessbeschreibung erfolgt auf Basis dieser Rechengrößen. Den „höchsten“ Aktivitätsstrom bis ca. 800.000 Jahre zeigt das Radionuklid Ni-59. Nach ca. 70.000 Jahren steigt der Aktivitätsstrom von Ni-59 kontinuierlich an, bis er bei

ca. 250.000 Jahren sein Maximum erreicht (Abb. 5.5). Der Aktivitätsstrom bleibt bis ca. 800.000 Jahre auf diesem Maximum und nimmt dann aufgrund des radioaktiven Zerfalls von Ni-59 (Halbwertszeit $7,5 \cdot 10^4$ Jahre) langsam ab. Nach 800.000 Jahren zeigt Zr-93 den „höchsten“ Aktivitätsstrom. Aufgrund der längeren Halbwertszeit von Zr-93 ($1,5 \cdot 10^6$ Jahre) nimmt dieser nicht ab, sondern steigt weiter an. Die Aktivitätsströme von Tc-99 und Cl-36 zeigen ebenfalls einen Anstieg bis zum Ende des Simulationszeitraumes. Der Aktivitätsstrom von Nb-94 nimmt anfangs zu, fällt aber nach ca. 200.000 Jahren bedingt durch die relativ kurze Halbwertszeit von 20.000 Jahren wieder ab. Die Aktivitätsströme der anderen dargestellten Radionuklide steigen im Laufe der Zeit, aber auf einem sehr viel niedrigeren Niveau, ebenfalls an.

Der stufenweise Anstieg der dargestellten Aktivitätsströme ist durch die sukzessive Lösungssättigung der Einlagerungsfelder bedingt. Je mehr Einlagerungsfelder gefüllt sind, desto höher wird der Widerstand durch den sich aufbauenden Gegendruck und desto geringer wird der Einstrom in das Endlager. Gleichzeitig werden mehr Radionuklide diffusiv freigesetzt. Durch den geringeren Einstrom nimmt der dem advektiven Strom entgegen gerichtete diffusive Transport zu und ein geringer Anteil der freigesetzten Radionuklide gelangt zum Streckenverschluss.

Da die rechenstechnisch ermittelten maximalen Aktivitätsströme in diesen Rechenfällen nach $1 \cdot 10^6$ Jahren kleiner als 10^{-5} Bq/a sind (1 Zerfall in 100.000 Jahren) findet praktisch keine Freisetzung statt. Das Ergebnis selbst führt hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase praktisch zu einer Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem mit Null gleichzusetzenden RGI (rechenstechnisch: 10^{-11}).

Parametervariationen des Referenzszenariums: Rechenfall PV-R4

Dieser Rechenfall ist eine Variation des Rechenfalls PV-R3, d. h. die dort beschriebenen Annahmen bezüglich der Restporosität, der Kompaktionsgeschwindigkeit und der Modellierung sind identisch. Abweichend werden jedoch bei der Modellierung die hydraulischen Eigenschaften der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 (Abb. 3.1), die die Strukturteile enthält, wie in Kap. 4.3.3.1 beschrieben verändert. Für das Volumen der Abschnitte der Strecke Ost 12.7, die die Behälter mit Strukturteilen enthalten, wird eine Porosität von 25 % unterstellt. Eine Kompaktion findet in diesen Abschnitten der Strecke nicht statt, die Diffusionskonstante wird aufgrund der höheren Porosität von 25 %

(Berücksichtigung des nicht kompaktierbaren Gebindevolumens) auf $1 \cdot 10^{-09} \text{ m}^2/\text{s}$ gesetzt.

Die über den Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) freigesetzten Aktivitätsströme sind rechnerisch um ungefähr den Faktor 10 geringer als im Rechenfall PV-R3, zeigen aber einen sehr ähnlichen Verlauf. Damit ist der Rechenfall PV-R3 abdeckend, es werden keine weiteren Ergebnisse dargestellt. Wie im Rechenfall PV-R3 findet ebenfalls keine Freisetzung statt, der RGI ist 0.

Parametervariationen des Referenzszenariums: Rechenfall PV-R5

Dieser Rechenfall ist eine Parametervariation des Rechenfalls PV-R3, d. h. die dort beschriebenen Annahmen bezüglich der Restporosität, der Kompaktionsgeschwindigkeit und der Modellierung sind identisch. Abweichend wird jedoch eine geringere Diffusionskonstante von $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ angenommen.

In diesem Rechenfall sind die an den Streckenverschlüssen freigesetzten Aktivitätsströme um mehrere Zehnerpotenzen geringer als im Rechenfall PV-R3, zeigen aber ebenfalls einen ähnlichen Verlauf. Damit findet in diesem Rechenfall keine Freisetzung statt, der RGI ist 0.

Parametervariationen des Referenzszenariums: Rechenfälle PV-R6 und PV-R7

Aufgrund der Vollständigkeit bezüglich der durchzuführenden Analysen zu den Endlagerkonzepten und zum Vergleich mit den Rechenfällen PV-R2 und PV-R3 wird in diesen Rechenfällen der Westflügel mit modelliert. Es wird die Einlagerungsvariante AB1 betrachtet und mit einer Restporosität von 2 % eine Advektion unterstellt. Da die Auswirkung des Gasgedrucks beim Einströmen von Lösung in den Westflügel durch MARNIE nicht erfasst werden kann, sind diese Ergebnisse (s. Kap. 4.3.1) nicht quantitativ belastbar. Da sie jedoch zum Systemverständnis beitragen, werden die Ergebnisse des Rechenfalls PV-R6, dessen Ergebnisse mit dem des Rechenfalls PV-R7 identisch sind, hier kurz dargestellt.

Die Volllaufphase bis zur Lösungssättigung des Infrastrukturbereiches und der angrenzenden Streckenverschlüsse und auch die Kompaktion der mit Salzgrus versetzten Strecken entsprechen derjenigen des Rechenfalls PV-R3. Die an die Streckenverschlüsse angrenzenden Richtstrecken haben die Restporosität von 2 % erreicht, bevor sich aufgrund der Lösungssättigung des Infrastrukturbereiches nach ca. 51.000 Jahren

ein hydraulischer Fluiddruck (Anbindung an das Deckgebirge) an den Streckenverschlüssen aufbauen kann. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt aufgrund der unterstellten Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung ein Einstrom von Lösung sowohl in den Ost- als auch in den Westflügel. Der Einstrom von Lösungen aus dem Infrastrukturbereich in das Endlager ist auch nach $1 \cdot 10^6$ Jahren nicht beendet. Bis zum Ende des Nachweiszeitraums von $1 \cdot 10^6$ Jahren sind im Ostflügel die Einlagerungsfelder Ost 12 bis Ost 8 einschließlich der angrenzenden Richtstrecken lösungsgesättigt, zusätzlich einige Strecken im Feld Ost 7.

Im Westflügel sind alle Richtstrecken und Querschläge sowie zwei Einlagerungsstrecken des Einlagerungsfeldes West 2, die der Richtstrecke Süd am nächsten liegen, gefüllt. Grund des geringen Füllstandes ist der Salzgrusversatz der Einlagerungsstrecken im Westflügel, der, da die Abfallgebinde nicht kompaktierbar sind, eine Porosität von 25 % und damit ein sehr viel größeres zu füllendes Volumen aufweist. Abb. 5.6 zeigt die errechnete Lösungssättigung des gesamten Endlagers nach $1 \cdot 10^6$ Jahren. Diese Ergebnisse sind allerdings immer unter der Einschränkung zu betrachten, dass der Gasgegendruck im Westflügel nicht berücksichtigt werden konnte.

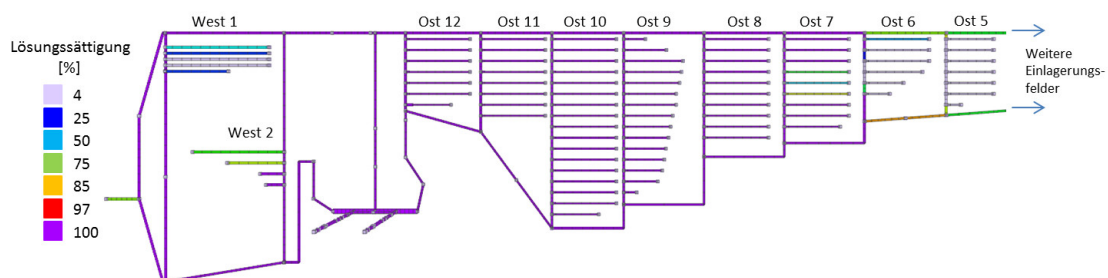


Abb. 5.6 Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Rechenfall PV-R6

5.1.2 Ergebnisse der Rechenfälle der Alternativszenarien

5.1.2.1 Alternativszenarium Schachtverschlussversagen

Rechenfall A1

Für das Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* wird eine Erhöhung der Permeabilität der Dichtelemente beider Schächte integral auf $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ direkt nach dem Verschluss des Endlagers angenommen. Die Streckenverschlüsse und die Dichtprop-

fen in den Querschlügen behalten dagegen ihre auslegungsgemäße Eigenschaften /MÜL 12b/ bis zum Ende ihrer Funktionsdauer von 50.000 Jahren. Danach wird die Permeabilität um ca. 3 Größenordnungen erhöht. Für den Rechenfall A1 wird „schnelle“ Kompaktion unterstellt.

Die Restporosität von 1 % in allen mit Salzgrus versetzten Strecken wird im Rechenfall A1 wie im Rechenfall R1 zum Referenzszenarium in allen der Kategorie „trocken/kalt“ zugeordneten Strecken (Abb. 4.5) nach spätestens 6.000 Jahren erreicht. Auch die Salzgruskompaktion in den restlichen Strecken des Endlagers ist – dem Rechenfall R1 entsprechend – zu denselben Zeiten bis zur Restporosität abgeschlossen. Die zugehörigen Porositätsverläufe können der Abb. 5.1 entnommen werden.

Der Infrastrukturbereich und die angrenzenden Streckenverschlüsse sind aufgrund der für die Dichtelemente im Schacht angenommenen Permeabilität von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ nach ca. 1.100 Jahren mit Lösung gefüllt. Zu diesem Zeitpunkt haben alle angrenzenden Richtstrecken bereits die Restporosität erreicht, bei der keine Advektion mehr stattfinden kann. Bei einer rechentechnischen Permeabilität von $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ wird bei dieser Restporosität aufgrund des an den Streckenverschlüssen anstehenden hydrostatischen Druckes und damit gegenüber den nicht lösungsgefüllten Richtstrecken hohen Druckgradienten von fast 10 MPa ein geringer advektiver Lösungsstrom berechnet. Dieser geringe Lösungseinstrom füllt innerhalb des Simulationszeitraumes von $1 \cdot 10^6$ Jahren lediglich die an die Streckenverschlüsse Ost, Mitte und West angrenzenden Richtstrecken (Zeitdauer ca. 315.000 Jahre, wobei als letzte die Richtstrecke Süd zum Westflügel hinter dem Streckenverschluss West bis zum Abzweig des Querschlags West 2 gefüllt wird). Weitere Strecken werden innerhalb des Nachweiszeitraumes nicht gefüllt. Abb. 5.7 zeigt die Lösungssättigung der Strecken des geplanten Endlagers nach $1 \cdot 10^6$ Jahren in verschiedenen Sättigungsstufen.

Der Rechenfall A1 zum Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* zeigt dasselbe Ergebnis wie der Rechenfall R1 zum Referenzszenarium, die Lösungssättigung am Ende des Simulationszeitraumes ist identisch. Da die Lösung weder in den trockenen Salzgrusversatz der Querschlüge noch in den der Einlagerungsstrecken vordringt, kann eine Freisetzung in die wässrige Lösung nicht erfolgen. Dies führt schließlich hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase zu einer Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem $\text{RGI} = 0$. Dies zeigt die sicherheitskonzeptionell große Bedeutung des Infrastrukturbereiches.

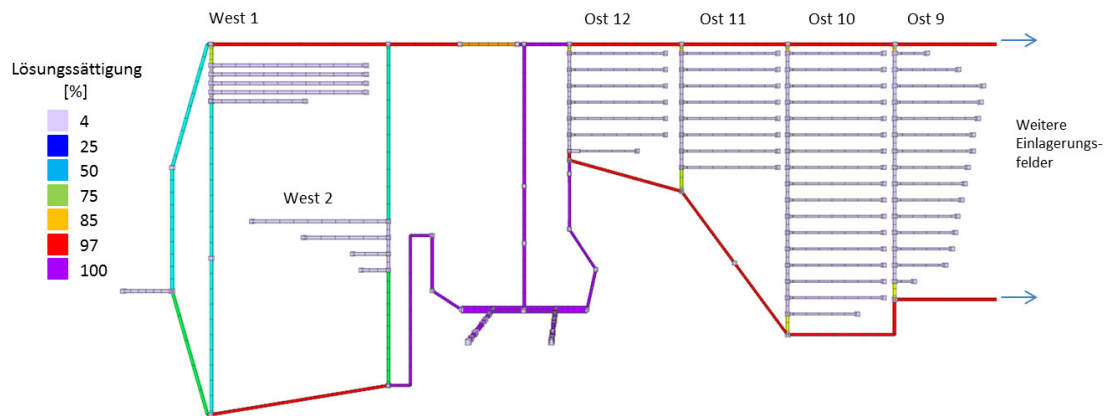


Abb. 5.7 Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen*

5.1.2.2 Parametervariationen auf Basis des Alternativszenariums Schachtverschlussversagen

Parametervariation des Alternativszenariums: Rechenfall PV-A1

Im Rechenfall PV-A1 wird im Gegensatz zum Rechenfall A1 „langsame“ Kompaktion postuliert. Alle anderen Randbedingungen des Rechenfalls A1 bleiben konstant. Die Restporosität des Salzgrusversatzes von 1 % wird wie im Rechenfall PV-R1 zum Referenzszenarium, bei dem ebenfalls „langsame“ Kompaktion angenommen wurde, in allen der Kategorie „trocken/kalt“ zur Berechnung der Kompaktion zugeordneten Strecken (Abb. 4.5) nach spätestens 7.300 Jahren erreicht. Auch in allen anderen Strecken des Endlagers sind die Zeitpunkte bis zur Kompaktion des Salzgrusversatzes bis zur Restporosität von 1 % identisch mit denen des Rechenfalls PV-R1. Die entsprechenden Porositätsverläufe in den unterschiedlichen Strecken können folglich der Abb. 5.1 entnommen werden.

Die Ergebnisse bezüglich der Lösungssättigung der Strecken sind mit denen des Rechenfalls A1, in dem „schnelle Kompaktion“ unterstellt wurde, identisch. Auch in diesem Fall haben die an den Infrastrukturbereich angrenzenden Richtstrecken bereits die Restporosität von 1 %, bei der keine nennenswerte Advektion mehr stattfindet, erreicht, bevor der Infrastrukturbereich lösungsgesättigt ist und sich ein hydraulischer Druck an den Streckenverschlüssen aufbauen kann. Dies bedeutet, dass alle für den Rechenfall A1 zum Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* getroffenen Aussagen bezüglich des Erreichens der Lösungssättigung der einzelnen Strecken ebenfalls gelten. Die

Lösungssättigung nach $1 \cdot 10^6$ Jahren ist identisch und kann deshalb Abb. 5.7 entnommen werden. Da die Lösung weder in die Querschläge noch in die Einlagerungsstrecken vordringt, kann keine Freisetzung von Radionukliden in die Lösungsphase erfolgen. Dies führt schließlich zu einer Null-Freisetzung gelöster Radionuklide über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem $RGI = 0$ (vollständiger Einschluss der Radionuklide).

Parametervariationen des Alternativszenariums: Rechenfälle PV-A2 bis PV-A6

In diesen Rechenfällen wird für den kompaktierten Salzgrusversatz eine Restporosität von 2 % mit einer nicht vernachlässigbaren Advektion unterstellt, nach der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung errechnet sich eine zugehörige Permeabilität von $7,3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$. Aus den in Kap. 4.3.1 ausführlich beschriebenen Gründen wird nur die Einlagerungsvariante B1 betrachtet. In den Rechenfällen wird sowohl die „schnelle“ als auch die „langsame“ Kompaktion untersucht, die Modellierung der Einlagerungsstrecke für die Strukturteile Ost 12.7 (Abb. 3.1), wie bereits in Kap. 4.3.3.1 ausführlich beschrieben, variiert und eine geringere Diffusionskonstante angenommen. In Tab. 4.14 sind die zum Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* durchgeführten Simulationsrechnungen aufgeführt.

Der Infrastrukturbereich und die angrenzenden Streckenverschlüsse sind aufgrund der für die Dichtelemente im Schacht angenommenen Permeabilität von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ in den Rechenfällen PV-A2 bis PV-A6 nach ca. 1.100 Jahren mit Lösung gefüllt, zu diesem Zeitpunkt hat der Salzgrusversatz in den angrenzenden Richtstrecken bereits die Restporosität von 2 % erreicht. Aufgrund der sich ab diesem Zeitpunkt aufbauenden hydraulischen Anbindung an das Deckgebirge erfolgt wie in den Rechenfällen PV-R2 und PV-R3 zum Referenzszenarium (Kap. 5.1.1.2) ein Einstrom in den Ostflügel. Die anschließende Volllaufphase verläuft wie in den Rechenfällen PV-R2 und PV-R3 beschrieben (Kap. 5.1.1.2), setzt hier allerdings bereits nach 1.100 Jahren ein, so dass nach $1 \cdot 10^6$ Jahren die Einlagerungsfelder Ost 12 bis Ost 6 einschließlich der angrenzenden Richtstrecken vollständig lösungsgesättigt sind. Ansonsten unterscheiden sich die Rechenfälle PV-A2 bis PV-A6 in Bezug auf die Volllaufphase, die Radionuklidfreisetzung und den Radionuklidtransport innerhalb des Endlagers und in Richtung der Streckenverschlüsse nur unwesentlich von den Rechenfällen PV-R2 und PV-R3. Die entsprechenden Erläuterungen können daher der Beschreibung der Rechenfälle PV-R2 und PV-R3 in Kap. 5.1.1.2 entnommen werden.

Abb. 5.8 zeigt beispielhaft die Aktivitätsströme einiger für die Berechnung des RGI relevanter Radionuklide am Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) im Rechenfall PV-A4. Dieser Rechenfall entspricht in allen Randbedingungen bis auf dem vorzeitigen Versagen der Schachtverschlüsse dem Rechenfall PV-R3. Der Vergleich der Aktivitätsströme für die Rechenfälle PV-A4 (Abb. 5.8) und PV-R3 (Abb. 5.5) zeigt, dass im Rechenfall PV-A4 die Aktivitätsströme der Radionuklide denselben charakteristischen Kurvenverlauf zeigen wie im Rechenfall PV-R3, wobei jedoch der Anstieg im Rechenfall PV-A4 aufgrund des vorzeitigen Schachtverschlussversagens eher einsetzt und die Aktivitätsströme auf etwas höhere Werte ansteigen. Dies geschieht allerdings auf sehr niedrigem Niveau, da auch in diesem Rechenfall die rechen technisch ermittelten maximalen Aktivitätsströme nach $1 \cdot 10^6$ Jahren bei Werten kleiner als 10^{-5} Bq/a liegen. Dies gilt für die Rechenfälle PV-A2 bis PV-A6 insgesamt. Da dies einem Zerfall in 100.000 Jahren entspricht, ist die Freisetzung praktisch 0. Die Ergebnisse führen schließlich hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase jeweils zu einer quasi Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem mit Null gleichzusetzenden RGI (rechnerisch: 10^{-11}).

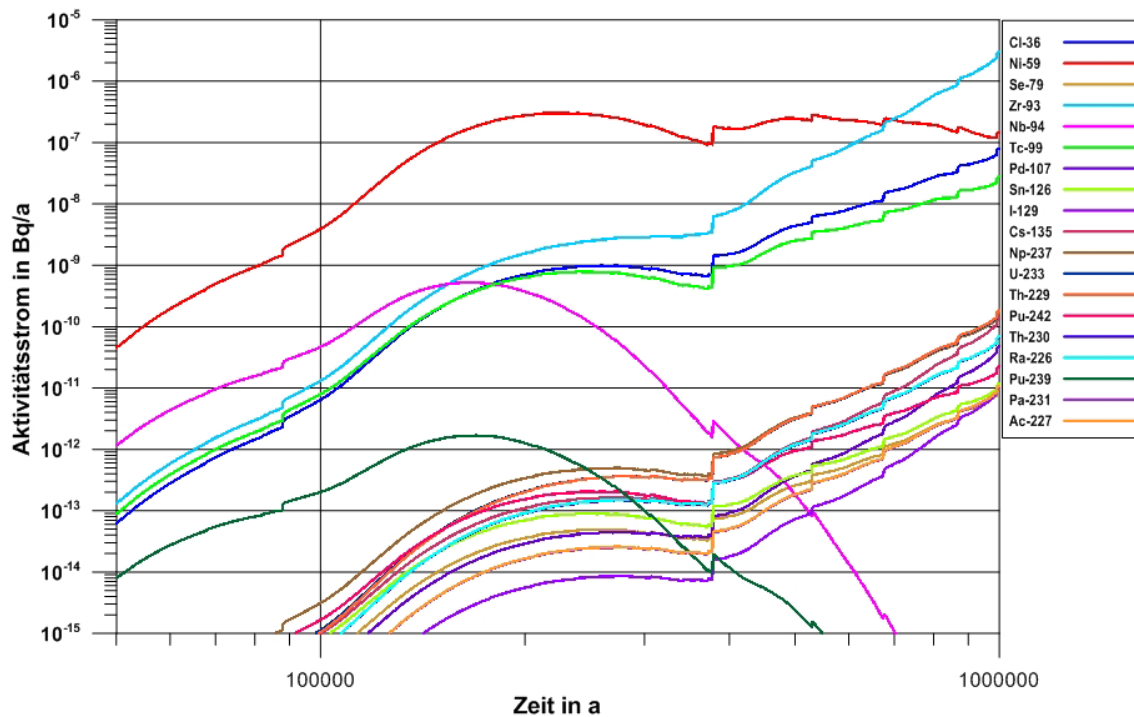


Abb. 5.8 Aktivitätsströme der für die Berechnung des RGI relevanten Radionuklide am Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) im Rechenfall PV-A4

5.1.2.3 Alternativszenarium Streckenverschlussversagen

Aufgrund der nahezu gleichen Abläufe des Zutritts von Lösungen aus dem Infrastrukturbereich wird das Alternativszenarium *Streckenverschlussversagen* durch den Rechenfall des Referenzszenariums abgedeckt. In diesem Alternativszenarium versagt nach der Szenarienentwicklung ein Streckenverschluss vorzeitig, d. h. mit Beginn des Verschlusses des Endlagers. In den hier durchgeführten Überlegungen für die radiologische Konsequenzenanalyse wird konservativ vom maximalen Versagen aller Streckenverschlüsse bereits zu Beginn des Simulationszeitraumes ausgegangen, d. h., die Permeabilität der Streckenverschlüsse wird gegenüber der Auslegung um ca. 3 Größenordnungen erhöht. Die Modellrechnungen für das Referenzszenarium zeigen, dass die Lösungsmenge im Infrastrukturbereich erst nach Ausfall der Dichtelemente im Schacht signifikant bis zur Lösungssättigung ansteigt. Der Zutritt salzstockinterner Lösungsmengen z. B. aus der Gorlebenbank sind mit einer Lösungsmenge von 10.200 m^3 in den Alternativszenarien nicht in der Lage, den Infrastrukturbereich mit Lösung zu sättigen bzw. einen hydraulischen Druck auf die versagenden Streckenverschlüsse aufzubauen. Damit steht im Alternativszenarium *Streckenverschlussversagen*

wiederum erst nach mehr als 50.000 Jahren ein ausreichender hydrostatischer Druck über den Schacht an den Streckenverschlüssen an. Im Zeitraum bis 50.000 Jahre ist der Druckgradient zwischen dem Infrastrukturbereich und den Streckenverschlüssen aufgrund der geringen Lösungsmenge im Infrastrukturbereich zu gering, um sicherheitsrelevante Lösungsmengen über die Streckenverschlüsse in die Richtstrecken zu transportieren, insbesondere da die Richtstrecken spätestens nach 7.500 Jahren ihre Restporosität von 1 % erreicht haben und damit kein nennenswerter advektiver Transport mehr stattfindet. Dies deutet die Redundanz der geotechnischen Verschlussmaßnahmen (der Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse) in den ersten 50.000 Jahren an. Da zu diesem Zeitpunkt auch im Rechenfall des Referenzszenariums sowohl die Streckenverschlüsse als auch die Schachtverschlüsse ihre Lebensdauer erreichen und die Permeabilität um ca. 3 Größenordnungen erhöht wird, sind die Rechenfälle im Ergebnis identisch. Es findet keine Freisetzung von Radionukliden statt, der RGI = 0.

5.1.3 Ergebnisse der What-if-Rechnungen zum Systemverständnis und zur Bewertung der Robustheit der Analysen

5.1.3.1 What-if-Rechenfälle auf Basis des Referenzszenariums

Die im Folgenden beschriebenen Rechenfälle sind What-if-Betrachtungen auf Basis einer Beschreibung von Entwicklungen außerhalb der wahrscheinlichen bzw. weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP. Sie basieren auf dem Rechenfall PV-R3 zum Referenzszenarium, d. h., es wird eine Restporosität von 2 % mit unterstellter Advektion bei langsamer Kompaktion für die Einlagerungsvariante B1 angenommen. Die Volllaufphase ist folglich mit der in Kap. 5.1.1.2 für den Rechenfall PV-R3 beschriebenen identisch. In diesen Rechnungen wird zum weitergehenden Systemverständnis der Einfluss einer erhöhten Diffusionskonstante von $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ und einer auf freie Lösung bezogenen molekularen Diffusionskonstanten von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ mit unterschiedlichen Freisetzungsraten aus den Hüllrohren und Strukturteilen untersucht. Zusätzlich wird die Modellierung der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile (Abb. 3.1), wie in Kap. 4.3.3.1 ausführlich beschrieben, variiert. Die charakteristischen Eingabegrößen für die beschriebenen Rechenfälle sind in Tab. 5.1 aufgeführt.

Tab. 5.1 What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Referenzszenariums (Einlagerungsvariante B1)

Rechenfall What-if-Rechnung		Restporosität [%]/ Permeabilität [m ²]	Diff.konst. [m ² ·s ⁻¹]
Erhöhte Diff.konst. 1	WI-R1	2 7,3·10 ⁻¹⁹	5·10 ⁻¹⁰
Erhöhte Diff.konst. 2	WI-R2	2 % 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10 ⁻⁹
Erhöhte Diff.konst 2 + Var. Ost 12.7	WI-R3	2 % 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10 ⁻⁹
Erhöhte Diff.konst 2 + schnelle Freisetzung aus Hüllrohren u. Strukturteilen	WI-R4	2 % 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10 ⁻⁹
Erhöhte Diff.konst 2 + schnelle Freisetzung aus Hüllrohren u. Strukturteilen + Var. Ost 12.7	WI-R5	2 % 7,3·10 ⁻¹⁹	1·10 ⁻⁹

Die Aktivitätsströme am Streckenverschluss Ost (Abb. 4.1) zur Richtstrecke Süd im Ostflügel zeigen in den Rechenfällen WI-R2 bis WI-R5 alle denselben charakteristischen Verlauf. Die unterschiedliche Modellierung der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile bewirkt ebenso wie die Variation der Freisetzungzeiten der Radionuklide aus den Hüllrohren und Strukturteilen nur eine minimale Änderung der Aktivitätsströme über die Streckenverschlüsse, d. h., ihr Einfluss ist als gering einzuschätzen.

Die hier angenommenen Werte für die Diffusionskonstante haben jedoch, verglichen mit dem Rechenfall PV-R3, einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Aktivitätsströme. Wie erwartet ergeben sich bei einer erhöhten Diffusionskonstante von 5·10⁻¹⁰ m²/s im Rechenfall Wi-R1 und insbesondere für den Wert der Diffusionskonstante in der freien Lösung von 1·10⁻⁹ m²/s in den Rechenfällen WI-R2 bis WI-R6 Radionuklidfreisetzungen über die Streckenverschlüsse, allerdings auf einem sehr niedrigen Niveau. Unter Verwendung der unrealistisch hohen Diffusionskonstanten ist jedoch eine erhöhte Freisetzung von Radionukliden aus Brennelement-Behältern zu beobachten. Weitergehende Untersuchungen ergeben, dass in diesen Rechenfällen ein höherer Anteil der Radionuklide aus der Strecke Ost 12.6, die POLLUX®-10-Behälter enthält, gegen den Lösungseinstrom diffusiv in Richtung des Streckenverschlusses Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) transportiert wird.

Auch mit diesen unrealistisch hohen Werten führt das Ergebnis hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase zu einer Freisetzung über die Streckenver-

schlüsse (Annahme als Grenze des ewG), die bezüglich eines rechnerisch zu bestimmenden RGI fiktiv sind. Sie sind damit nur rechnerisch von Bedeutung und als geringfügig zu bewerten.

5.1.3.2 What-if-Rechenfälle auf Basis des Alternativszenariums Schachtverschlussversagen

In diesen Rechnungen zur Einlagerungsvariante B1 wird das instantane Versagen der Dichtelemente in beiden Schächten mit einer unrealistisch erhöhten Permeabilität von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ unterstellt. In drei Rechenfällen wird eine Restporosität von 1 % angenommen, zusätzlich wird in einem dieser Rechenfälle die Modellierung der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile (Abb. 3.1) variiert. In zwei weiteren Rechenfällen wird eine Restporosität von 2 % mit einer aufgrund der nach der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung berechneten Permeabilität von $7,3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ nicht zu vernachlässigenden Advektion unterstellt. In den Rechnungen wird sowohl „schnelle“ als auch „langsame“ Kompaktion postuliert. Tab. 5.2 enthält die charakteristischen Eingabegrößen für die beschriebenen Rechenfälle.

Tab. 5.2 What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Alternativszenariums *Schachtverschlussversagen*

Rechenfall What-if-Rechnung	Bez.	Kompaktion	Restporosität [%]/ Permeabilität [m^2]	Diff.konst. [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
Erhöhte Permeabilität Ausfall Dichtelemente Schacht	WI-A1	schnell	1 $1 \cdot 10^{-22}$	$1 \cdot 10^{-10}$
Erhöhte Permeabilität Ausfall Dichtelemente Schacht + Kompaktion	WI-A2	langsam	1 $1 \cdot 10^{-22}$	$1 \cdot 10^{-10}$
Erhöhte Permeabilität Ausfall Dichtelemente Schacht + Kompaktion + Var. Strecke Ost 12.7	WI-A3	langsam	1 $1 \cdot 10^{-22}$	$1 \cdot 10^{-10}$ Ost12.7 $1 \cdot 10^{-09}$
Erhöhte Permeabilität Ausfall Dichtelemente Schacht + Restporosität	WI-A4	schnell	2 $7,3 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^{-10}$
Erhöhte Permeabilität Ausfall Dichtelemente Schacht + Kompaktion + Restporosität	WI-A5	langsam	2 $7,3 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^{-10}$

* Fettgedruckt sind die variierten Parameter im Rechenfall.

Rechenfall WI-A1

Im Rechenfall WI-A1, bei dem für den Salzgrusversatz eine „schnelle“ Kompaktion und eine Restporosität von 1 % angenommen wird, sind der Infrastrukturbereich nach ca. 170 Jahren und die angrenzenden Streckenverschlüsse nach ca. 220 Jahren lösungsgesättigt. Der an den Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) angrenzende Abschnitt der Richtstrecke Süd bis zum Einlagerungsfeld Ost 12 hat zu diesem Zeitpunkt aufgrund der schnellen Kompaktion eine Porosität von 1,3 % und damit fast die Restporosität erreicht, so dass dieser geringe verbleibende Porenraum nach ca. 265 Jahren vollständig mit Lösung gesättigt ist. Zum Zeitpunkt der Lösungssättigung hat die Porosität in dieser Strecke die Restporosität von 1 % mit der programmtechnisch gesetzten Permeabilität von 10^{-22} m^2 erreicht. Aufgrund des dadurch bedingten minimalen Zutritts von Lösung dringt in den angrenzenden Querschlag im Feld Ost 12 nur eine geringe Lösungsmenge ein, diese reicht jedoch nicht aus, um in diesem Querschlag eine Lösungssättigung zu erreichen. Ein Lösungszutritt in die Einlagerungsstrecken findet nicht statt. Es erfolgt keine Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen.

Rechenfall WI-A2

Im Rechenfall WI-A2 wird abweichend zum Rechenfall Wi-A1 „langsame“ Kompaktion unterstellt. Die Ergebnisse dieses Rechenfalls liefern wichtige Erkenntnisse zum Systemverständnis.

Der Infrastrukturbereich und die angrenzenden Streckenverschlüsse sind nach ca. 220 Jahren lösungsgesättigt. Der Salzgrusversatz in dem an den Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel angrenzenden Abschnitt der Richtstrecke Süd (Abb. 4.1) bis zum Feld Ost 12, der aufgrund der Einlagerung der Strukturteile in der südlichsten Einlagerungsstrecke des Feldes Ost 12 der Kategorie „feucht, kalt“ für die Kompaktionsberechnung (Abb. 4.5) zugeordnet wird, ist zu diesem Zeitpunkt erst auf eine Porosität von 7,2 % kompaktiert. Bei Lösungssättigung dieser Strecke nach ca. 235 Jahren beträgt die Porosität ca. 6,3 %, d. h., die Kompaktion ist nicht abgeschlossen. Der angrenzende Querschlag im Feld Ost 12 bis zum Übergang in die angrenzende Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile ist bereits nach ca. 262 Jahren bei einer Porosität von ca. 2 % lösungsgesättigt, da dieser Querschlag einen Dichtpfropfen aus Sorelbeton mit 80 % Anfangssättigung enthält und damit das zu füllende Volumen in der Einlagerungsstrecke gering ist. Anschließend erreichen der

Querschlag Mitte, die Richtstrecke Süd bis zum Feld Ost 11 und die Richtstrecke Nord bis zum Feld Ost 12 sowie drei weitere südliche Abschnitte des Querschlages im Feld Ost 12 eine Lösungssättigung. Nach ca. 762 Jahren ist als einzige Einlagerungsstrecke die Strecke Ost 12.7 (Strukturteile) bei einer Porosität von ca. 7,3 % lösungsgesättigt. Weitere Strecken im Endlager werden nicht gefüllt.

Abb. 5.9 zeigt die Lösungssättigung der Strecken des geplanten Endlagers nach $1 \cdot 10^6$ Jahren in verschiedenen Sättigungsstufen.

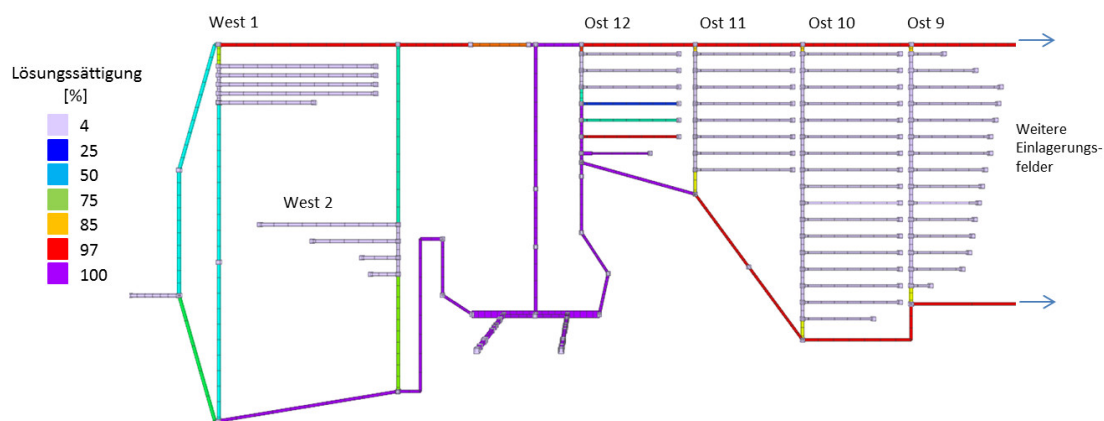


Abb. 5.9 Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Rechenfall WI-A2

Bei Eindringen von Lösung in die „trocken“ versetzten Querschläge und Einlagerungsstrecken wird die Kompaktionsgeschwindigkeit beschleunigt. In den Modellrechnungen mit MARNIE wird diese Beschleunigung konservativ erst bei einer vollständigen Lösungssättigung angenommen, in der Realität tritt diese bereits bei einer Teilsättigung des Salzgruses auf. Trotz einer erhöhten Kompaktionsgeschwindigkeit beträgt die Porosität in der Einlagerungsstrecke für die Strukturteile nach $1 \cdot 10^6$ Jahren noch ca. 4,7 %. Dies wird durch den sich aufbauenden nahezu lithostatischen Fluidinnendruck in der Einlagerungsstrecke bewirkt. Der Druckaufbau erfolgt, weil der durch die Kompaktion des Salzgrusversatzes erzeugte Massenstrom nur zu einem kleinen Teil in die bereits fast bis zur Restporosität kompaktierten angrenzenden Querschläge abfließen kann. Die Kompaktion dauert während des gesamten Simulationszeitraumes an und ist auch am Ende noch nicht beendet.

Die freigesetzten Radionuklide werden in dieser Rechnung folglich sowohl diffusiv als auch advektiv aus der Einlagerungsstrecke für die Strukturteile heraus transportiert. Auch in den angrenzenden lösungsgefüllten Querschlägen und dem an den Stre-

ckenverschluss Ost angrenzenden Abschnitt der Richtstrecke Süd baut sich rasch ein hoher Fluidinnendruck auf. Hier wird das Auspressen des kompaktionsinduzierten Massenstroms in Richtung des Infrastrukturbereiches durch den weiterhin über die Schächte erfolgenden Lösungseinstrom erschwert. Nach ca. 800 Jahren hat sich jedoch der Fluidinnendruck in der Richtstrecke am Streckenverschluss Süd zum Ostflügel soweit aufgebaut, dass er den am Schachtverschluss anstehenden hydrostatischen Fluiddruck übersteigt. Dies bewirkt eine Strömungsumkehr, so dass statt des Lösungseinstroms jetzt ein Lösungsausstrom aus dem Endlager und damit eine sowohl minimal advective als auch diffusive Freisetzung der Radionuklide in den Infrastrukturbereich erfolgt.

Da auch hier die Aktivitätsströme vernachlässigbar gering bleiben, führt auch dieser What-if-Rechenfall mit einer unrealistisch hohen Permeabilität des Schachtverschlusses hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase zu einer Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG), die nur rechnerisch von Bedeutung ist. Jedoch weisen die Analysen eine mögliche Optimierung für das Endlagerdesign aus, nämlich die Verlagerung der Behälter der Strukturteile in ein Streckenverschluss fernes Einlagerungsfeld.

Rechenfall WI-A3

In bisherigen Rechenfällen wird für die Strecke mit den endgelagerten Brennelement-Strukturteilen das radioaktive Inventar, da die Gebindevolumina aus dem Streckenvolumen herausgerechnet werden – sie kompaktierten nicht und behalten ihren Restraumvolumen bei –, dem verbliebenden Salzgrusversatzvolumen in der Einlagerungsstrecke zugeordnet. Im Rechenfall WI-A3 wird abweichend zum Rechenfall WI-A2 die Modellierung der Einlagerungsstrecke Ost 12.7 für die Strukturteile variiert (Kap. 4.3.3.1). Da diese Strecke in mehrere Abschnitte unterteilt wird, in denen für das Streckenvolumen ein Gebindevolumen von 25 % ohne Kompaktion angenommen wird, füllt sich in diesem Rechenfall nur ein kleiner an den Querschlag angrenzender Teil der gesamten Einlagerungsstrecke nach ca. 1.800 Jahren. Der größte Anteil der Einlagerungsstrecke bleibt lösungsfrei. Da außerdem in der Einlagerungsstrecke keine Kompaktion stattfindet, werden die mobilisierten Radionuklide nur diffusiv freigesetzt. Deshalb sind die freigesetzten Aktivitätsströme erheblich geringer als im Fall WI-A2.

Rechenfall WI-A4 und WI-A5

Die beiden Rechenfälle dienen zum Systemverständnis zur Auswirkung von „schneller“ und „langsamer“ Kompaktion bei einem instantanen Versagen der Dichtelemente in beiden Schächten mit einer unrealistisch erhöhten Permeabilität von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ und einer Restporosität von 2 % mit unterstellter Advektion. Die Ergebnisse der Rechenfälle WI-A4 und WI-A5, bei denen i einmal die „schnelle“ (WI-A4) und einmal die „langsame“ Kompaktion (WI-A5) angenommen wird, unterscheiden sich in ihren Konsequenzen nur geringfügig. Die Aktivitätsströme werden wie in allen bereits beschriebenen Rechenfällen von Ni-59 und Zr-93 bestimmt und sind in beiden Rechenfällen am Ende des Simulationszeitraumes nach $1 \cdot 10^6$ Jahren am Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) mit maximal 10^{-5} Bq/a als äußerst geringfügig einzuschätzen, so dass es sich um reine Rechengrößen handelt.

Das Ergebnis des Rechenfalls WI-A5, in dem für die Permeabilität der Dichtelemente im Schacht $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ angenommen wird, ähnelt in seinen Konsequenzen den Ergebnissen der Rechenfälle PV-R3 und PV-A4, in denen als Parametervariation des Referenz- und des Alternativszenariums ebenfalls eine Restporosität von 2 % mit unterstellter Advektion bei langsamer Kompaktion angesetzt wird.

Abb. 5.10 zeigt als Ergebnis dieser drei Rechenfälle (PV-R3, PV-A4 und WI-A5) die Aktivitätsströme der Radionuklide Ni-59 und Zr-93, die in allen Rechenfällen dominieren. Das Maximum der Aktivitätsströme ist in allen drei Rechenfällen annähernd gleich und mit weniger als $1 \cdot 10^{-5} \text{ Bq/a}$ (1 Zerfall in 100.000 Jahren) äußerst niedrig und damit nur als Rechengröße zu betrachten.

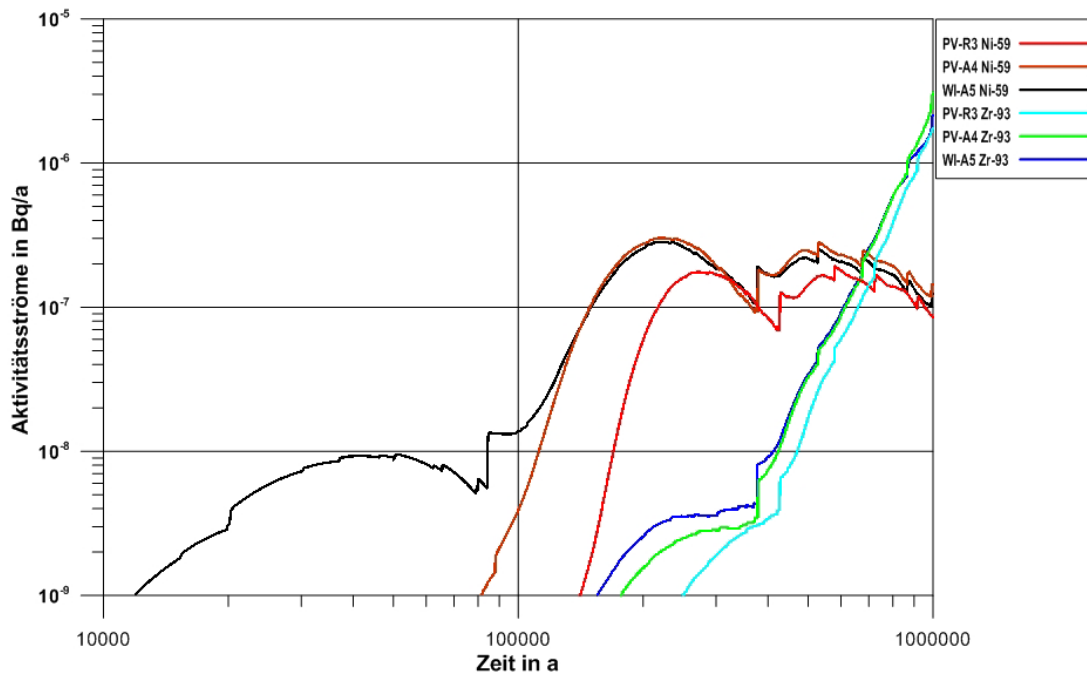


Abb. 5.10 Aktivitätsströme der Radionuklide Ni-59 und Zr-93 über den Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) in den Rechenfällen PV-R3, PV-A4 und WI-A5

Aus den Ergebnissen der drei Rechenfälle PV-R3, PV-A4 und WI-A5 (Abb. 5.10), bei denen eine Restporosität von 2 % mit unterstellter Advektion angenommen wird und die Freisetzung über die Streckenverschlüsse bei Annahme einer maximalen Diffusionskonstante von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ rein diffusiv gegen den Einstrom erfolgt, können folgende Erkenntnisse gewonnen werden: Bei einem rein diffusiven Transport erfolgt das Maximum einer Freisetzung von gelösten Radionukliden als reine Rechengröße ohne reale Bedeutung über die Streckenverschlüsse immer zum Ende des Simulationszeitraumes und ist nahezu unabhängig vom Beginn der Freisetzung.

Aus der Auswertung der Rechenfälle kann gefolgert werden, dass in allen beschriebenen Rechenfällen, in denen eine Radionuklidfreisetzung (wenn auch auf sehr niedrigem Niveau) stattfindet, der Hauptbeitrag durch die Radionuklide aus der für die Einlagerung von Strukturteilen vorgesehenen Strecke Ost 12.7 geliefert wird. Bei einer eventuellen Optimierung der Endlagerplanung sollte dies berücksichtigt werden.

Weitere Rechenfälle

In weiteren Rechnungen auf Basis des Alternativszenariums *Schachtverschlussversagen* wird für die Endlagervariante B1 zusätzlich zur erhöhten Permeabilität der Dichtelemente von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ in beiden Schächten eine unrealistische hohe Diffusionskonstante von $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ unterstellt, um deren Einfluss zu untersuchen und damit das Systemverständnis zu vertiefen. Auch in diesen Rechenfällen wird eine Restporosität von 1 % ohne Advektion und von 2 % mit unterstellter Advektion angenommen und sowohl „schnelle“ als auch „langsame“ Kompaktion angenommen. Selbst unter Berücksichtigung dieser unwahrscheinlichen Annahmen bleiben die Freisetzungen nur rechnerisch von Bedeutung. Sie zeigen die Robustheit des Systems gegenüber Parameteränderungen, wie hier der Diffusionskonstanten, deren Werte über die wahrscheinliche Bandbreite hinausgehen, auf.

In einer weiteren Modellrechnung zum Systemverständnis und zur Untersuchung der Robustheit des Systems wird eine Flutung des gesamten Endlagers nach 500 Jahren angenommen. Die Kompaktionsgeschwindigkeit wird so eingestellt, dass zu diesem Zeitpunkt die Restporosität von 2 % in allen mit Salzgrus versetzten Strecken erreicht wird. Mit einer Diffusionskonstante von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ wird ein rein diffusiver Aktivitätsstrom der freigesetzten Radionuklide über die Streckenverschlüsse simuliert.

Diese Modellrechnung wird bis ca. $13 \cdot 10^6$ Jahre durchgeführt, und damit weit über den in /BMU 10/ geforderten Nachweiszeitraum hinaus. Zu diesem Zeitpunkt wird in Bezug auf die über die Streckenverschlüsse freigesetzten Radionuklide ein quasi stationärer Zustand erreicht. Auch in diesen Analysen sind die Aktivitätsströme so gering, dass sie nur rechnerisch von Bedeutung sind. Bereits nach ca. $10 \cdot 10^6$ Jahren haben die Aktivitätsströme der dominierenden Radionuklide ihr Maximum erreicht bzw. sind aufgrund kürzerer Halbwertzeiten bereits wieder abgefallen. Nach $1 \cdot 10^6$ Jahren sind die diffusiv freigesetzten Aktivitätsströme wie in allen anderen beschriebenen Rechenfällen so gering, dass es auch in diesem Rechenfall zum Systemverständnis mit einer vollständigen Lösungssättigung des gesamten Endlagers bei einer Restporosität von 2 % hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase nur zu einer geringfügigen Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) kommt. Auch am Ende des Simulationszeitraumes nach $13 \cdot 10^6$ Jahren ist die Freisetzung noch als geringfügig anzusehen.

5.2 Rechenfälle TOUGH2 (Zweiphasentransport)

Im Unterschied zu Kap. 5.1 wird mit TOUGH2 sowohl der Flüssigkeits- als auch der Gaspfad untersucht. Zur Bewertung der betrachteten Rechenfälle wird auch hier der in Kap. 2.1 definierte RGI (Radiologischer Geringfügigkeitsindex) herangezogen⁵. Zur Anwendung dieses vereinfachten radiologischen Nachweises wird die Freisetzung von Radionukliden über die Streckenverschlüsse in den Infrastrukturbereich berechnet. Es ist wichtig zu erwähnen, dass der RGI keine physikalische sondern eine Bewertungsgröße ist, so dass eine Interpretation des Systemverständnisses auf Basis der RGI nur bedingt zulässig ist.

Unter Verwendung der Gleichung (2.1) wird jeweils ein RGI für die flüssige Phase und unter Verwendung von Gleichung (2.2) für die Gasphase berechnet. Danach werden die RGI für die Flüssig- und Gasphase und für die in der jeweiligen Einlagerungsvariante existierenden Streckenverschlüsse summiert. Für die Einlagerungsvariante B1 bedeutet dies, dass der RGI auf Basis der C-14-Aktivitätsströme über die beiden Streckenverschlüsse Mitte und Ost errechnet wird. In der Einlagerungsvariante AB1 wird der RGI für drei Streckenverschlüsse (West, Mitte und Ost) berechnet. Im Falle der Rechnungen zum *Alternativszenarium „vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“* bezogen auf den nördlichen Streckenverschluss (Streckenverschluss in der Richtstrecke als Verbindung zwischen Ost- und Westflügel) wird ebenfalls der C-14-Aktivitätsstrom für die drei Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost errechnet. Der berechnete RGI ist in allen folgenden Abbildungen dargestellt. Tab. 5.3 gibt einen Überblick über die betrachteten Rechenfälle.

⁵ Anmerkung: für die RGI-Berechnung der Alternativszenarien ändert sich der Bezugswert von 0,01 mSv/a für das Referenzszenarium auf 0,1 mSv/a

Tab. 5.3 Überblick über die betrachteten TOUGH2-Rechenfälle

Rechenfallbezeichnung aus Ref.szenarium	Betrachtung (C-14 und Einlagerungsvariante B1, falls nicht anders erwähnt):
Y1 – Y9	- des Freisetzungsorts für defekte POLLUX®-10-Behälter - aller Behälter inkl. der 500 Jahre gasdichte POLLUX®-10-Behälter
Y10 – Y12	- von Korrosionsraten für alle BE-Behälter im Ostflügel
Y13	- einer erhöhten Wassermenge in den POLLUX®-10 Behälter
Y14	- separate Betrachtung der POLLUX®-9 Behälter
P1 – P5	- von Korrosionsraten und erhöhten Wassermengen BE-Strukturteile
P6 – P9	- von Korrosionsraten und aktualisierten Wassermengen für die BE-Strukturteile
P10	- der Optimierung hinsichtlich von 500 Jahre Gasdichtheit der Behälter für die BE-Strukturteile
U1 – U4	- Einlagerungsvariante AB1 - von Korrosionsraten nur für den Westflügel
U5	- Einlagerungsvariante AB1 - der Kombination von West- und Ostflügel
M1, M2	- I-129 - Unterschiedlicher Wassermengen in den POLLUX®-10 Behältern
M3, M4	- I-129 - des Einflusses der Diffusion (hier: Diffusion „abgeschaltet“)
Rechenfallbezeichnung aus Alt.szenarium	Betrachtung (C-14 und Einlagerungsvariante B1, falls nicht anders erwähnt):
Y-Z1 – Y-Z4	- des Freisetzungsorts für defekte POLLUX®-10 Behälter - aller Behälter inkl. der 500 Jahre gasdichte POLLUX®-10 Behälter
Y-Z5 – Y-Z7	- Streckenverschluss- und Schachtverschlussversagen - nur BE-Behälter im Ostflügel
Y-Z8	- der Korrosionsrate für alle BE-Behälter im Ostflügel
P-Z1 – P-Z3	- Streckenverschluss – und Schachtverschlussversagen - nur Behälter für BE-Strukturteile
P-Z4	- der Korrosionsrate für BE-Strukturteile
P-Z5	- der Optimierung hinsichtlich von 500 Jahre Gasdichtheit der Behälter für die BE-Strukturteile, sonst wie P-Z1
U-Z1 – U-Z5	- Einlagerungsvariante AB1 - Streckenverschluss- und Schachtverschlussversagen - Betrachtung West- und Ostflügel
U-Z6	- Einlagerungsvariante AB1 - der Korrosionsrate für die Betrachtung West- und Ostflügel

5.2.1 Rechenfälle zum Referenzszenarium

Rechenfälle für Brennelement Behälter (Y1 – Y14)

In Abb. 5.11 sind die Ergebnisse für die Rechenfälle Y1 – Y14 (s. Tab. 4.20 und Tab. 5.3), in denen der Ort einer initialen Freisetzung (s. Abb. 4.8) aus den Brennelement-Behältern variiert wird, dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in jedem dieser Rechenfälle (C-14-Transport aus den vier initial defekten und nach 500 Jahren aus den dann nicht mehr gasdichten Brennelement-Behältern) ein RGI von 1 unterschritten wird, in vielen Fällen deutlich. Für den Zeitraum 50 Jahre nach Verschluss des Endlagers zeigen die Resultate in Abb. 5.11 einen ersten Peak, der auf den Transport des C-14 aus den initial defekten POLLUX[®]-10-Behältern zurückzuführen ist.

Der abdeckende Rechenfall (Y9, s. Kap. 4.4.3) zeigt einen RGI von ca. 0,9 nach etwas mehr als 50 Jahren nach Verschluss des Endlagers. Für alle anderen Rechenfälle wird ein kleinerer RGI ermittelt. Zwischen 5.000 Jahre und 50.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers zeigen die Ergebnisse einen zweiten Peak, der auf den Verlust der Gasdichtheit der Behälter nach 500 Jahren zurückzuführen ist. Durch die dann bereits abgeschlossene Versatzkompaktion auf eine Restporosität von 1 % findet ein diffusiver und advektiver Gas- und Flüssigkeitstransport nur noch sehr langsam statt, so dass C-14 als Kohlendioxidgas aus dem Verlust der Gasdichtigkeit der Brennelement-Behälter erst ab 5.000 Jahren über die Streckenverschlüsse tritt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Lage der initial defekten Behälter einen großen Einfluss auf die errechneten Aktivitätsflüsse über die Streckenverschlüsse hat. Die Rechenfälle Y1 – Y3 (defekte Behälter in Feld Ost 12) zeigen einen insgesamt höheren RGI als die Rechenfälle Y4 und Y5 (defekte Behälter in Feld Ost 11). Für die Rechenfälle Y6 – Y8 zeigt Abb. 5.11 bis zu einem Zeitpunkt von 6.000 Jahren nach Verschluss einen $RGI < 1 \cdot 10^{-5}$ und kann deshalb in Abb. 5.11 nicht dargestellt werden. Nach einem Zeitraum zwischen 5.000 und 50.000 Jahren nach Verschluss steigt der RGI bis zu einem Wert von ca. 0,001 an.

Der Einfluss der Korrosionsrate zeigt sich ebenfalls in Abb. 5.11 abgebildet: Eine hohe Korrosionsrate führt zu einem hohen und frühen C-14-Austrag über die Streckenverschlüsse (Rechenfall Y10), während eine niedrige Korrosionsrate zu anfänglich niedrigem und frühem C-14-Austrag führt (Rechenfall Y12). In späteren Zeiträumen liegt dieser aber etwas höher als bei hoher Korrosionsrate. Dieser Effekt entsteht durch den

zusätzlich im Umfeld der Behälter entstehenden Gasdruckaufbau aufgrund der entstehenden Korrosionsgase. Die Korrosionsrate selbst hat im Modell keinen Einfluss auf die Freisetzung von C-14 aus den Brennelementen (Quellterm), da das C-14 im Modell instantan aus der IRF in den Porenraum des Salzgrusversatzes freigesetzt wird.

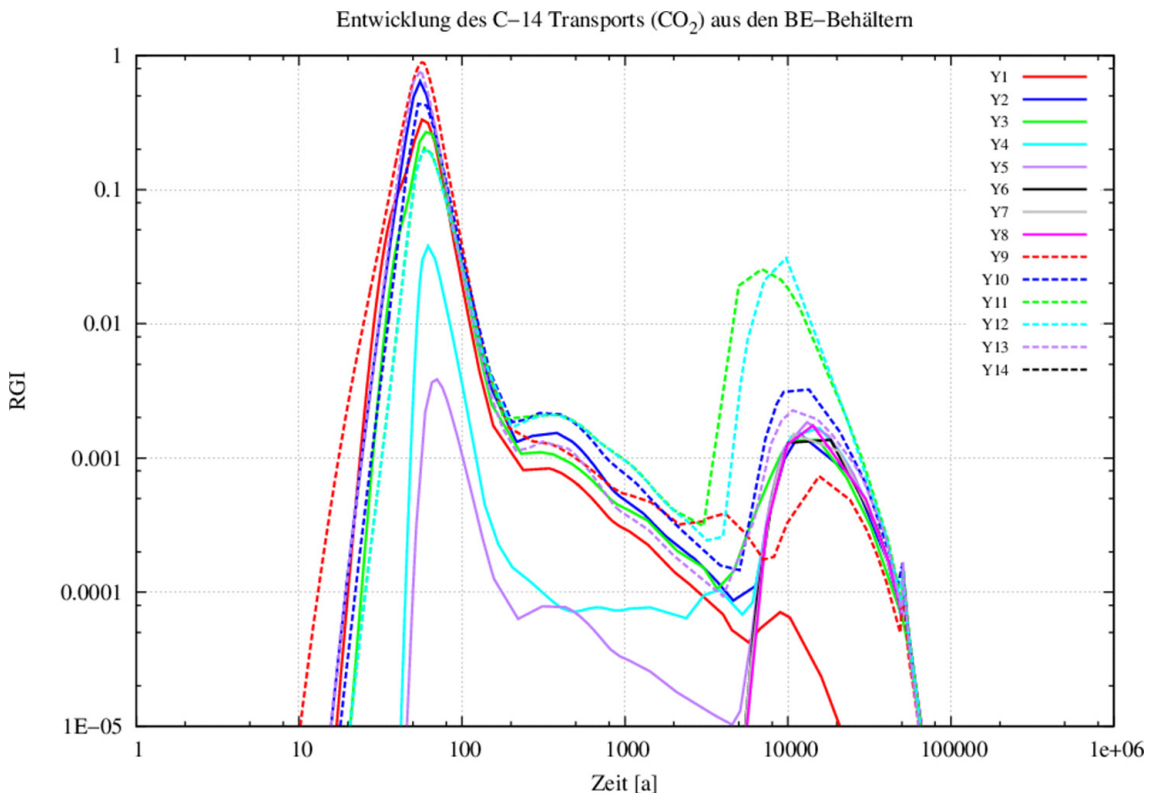


Abb. 5.11 C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 1

Rechenfälle für das Referenzszenarium (Y1 – Y14 s. Tab. 4.20 und Tab. 5.3), Einlagerungsvariante B1, intakte (500 Jahre gasdichte) und defekte POLLUX[®]-10-Behälter

Eine erhöhte initiale Wassermenge in den POLLUX[®]-10-Behältern in Rechenfall Y13 bedingt im Vergleich zu Rechenfall Y2 eine höhere C-14-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (s. Abb. 5.11). Auch hier ist der entstandene Gasdruck durch die unterschiedliche Behälterrestfeuchte die entscheidende Größe und wiederum nicht eine erhöhte Freisetzung aus den initial defekten Behältern, die wie oben erwähnt, in jedem Rechenfall instantan stattfindet.

Die über die Streckenverschlüsse freigesetzte C-14 Aktivität aus der IRF der Abfälle in den POLLUX[®]-9-Behältern der Felder Ost 2 und 3 führt zu einem RGI, der unterhalb von $1 \cdot 10^{-5}$ liegt und daher in Abb. 5.11 nicht darstellbar (Rechenfall Y14) ist.

Rechenfälle für Brennelementstrukturteil-Behälter (P1 – P9)

In Abb. 5.12 und Abb. A.3 (Anhang) ist der RGI für die Rechenfälle P dargestellt (C-14-Transport aus der Einlagerungsstrecke mit Behältern der Brennelemente-Strukturteile, s. Tab. 4.21 und Tab. 5.3). Im Ergebnis der Rechenfälle P1 – P9 wird ein RGI von 1 deutlich überschritten. Dies gilt nicht für Rechenfall P10 (s. Abb. 5.12), in welchem eine Optimierung hinsichtlich der Gasdichtheit der Behälter mit den Brennelemente-Strukturteilen angenommen wird. Die hohen RGI-Werte können auf eine Kombination mehrerer Ursachen zurückgeführt werden:

- Zunächst befindet sich die Einlagerungsstrecke in unmittelbarer Nähe (wenige Meter) zum östlichen Streckenverschluss, was einen proportional höheren Ausstrom über diesen zur Folge hat (s. Abb. A.4).
- Weiterhin ist im Vergleich zu den Einlagerungsstrecken mit den POLLUX®-10-Behältern der Ausnutzungsgrad des Streckenvolumens für die Behältereinlagerung sehr groß, d. h., es ist kaum Salzgrusversatz und somit kaum (initialer) Hohlraum vorhanden (der zur Verfügung stehende Hohlraum in den Behältern wird im Modell nicht berücksichtigt).
- Gleichzeitig ist – wie in allen Rechenfällen – im Rechenmodell der Zeitpunkt der Freisetzung der volatilen Radionuklide aus der IRF instantan und vollständig, d. h., es wird der sofort verfügbare IRF-Anteil aller volatilen Radionuklide (hier in Form von 20 % des Inventars an C-14 in den Hüllrohren) für alle vorhandenen Behälter mit den Brennelement-Strukturteilen (2.620 in dieser Strecke) gleichzeitig freigesetzt. Aufgrund der hohen Behälterzahl tritt hier der Effekt dieser instantanen und vollständigen 20 %igen IRF-Freisetzung aus allen Behältern mit Strukturteilen deutlicher als in den anderen Rechenfällen zu Tage (s. a. Abb. A.4).

Dass diese Prozesse die Hauptgründe für den hohen C-14-Fluss über die beiden Streckenverschlüsse sind, ist anhand der Ergebnisse des Rechenfalls P10 erkenntlich. Für diesen Rechenfall wurde für die Behälter der Brennelement-Strukturteile analog zu den POLLUX®-10-Behältern eine 500 Jahre andauernde Gasdichtheit postuliert. In der Konsequenz zeigt sich, dass es in den ersten 1.000 Jahren zu keiner Freisetzung über die Streckenverschlüsse kommt, und erst nach mehr als 2.000 Jahren ein maximaler RGI von $< 0,3$ berechnet wird.

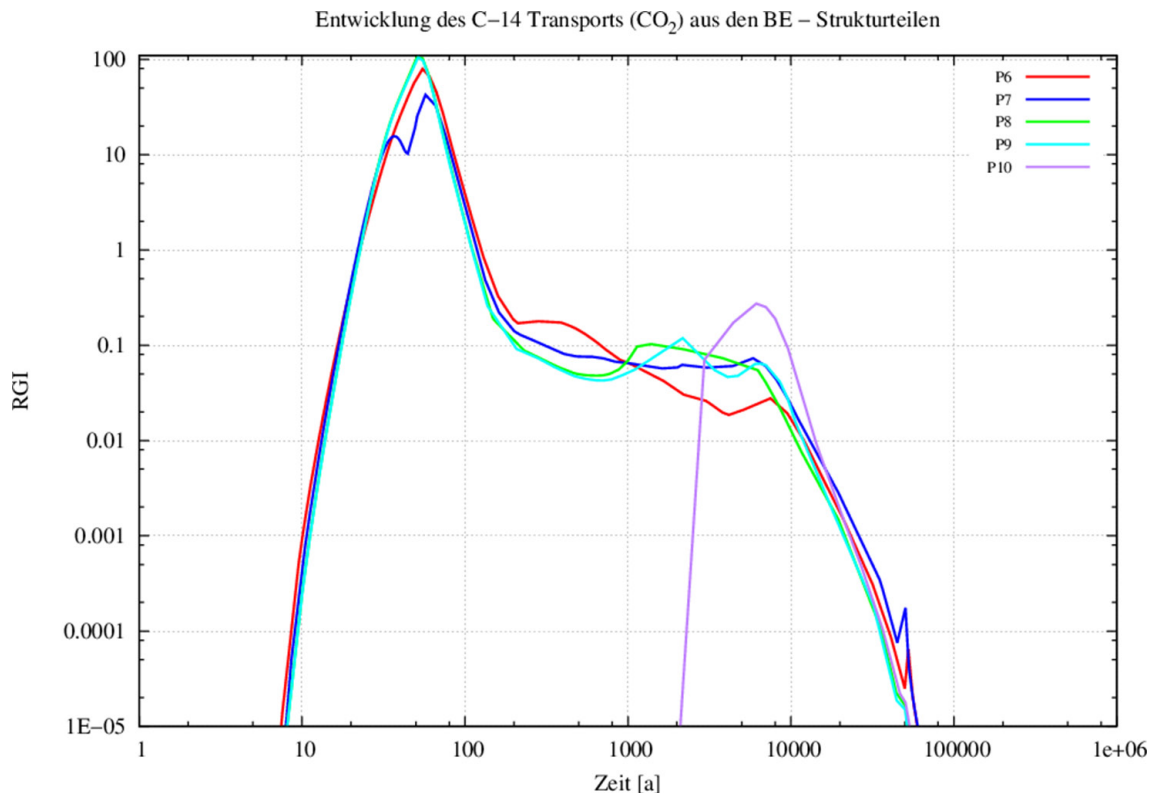


Abb. 5.12 C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 2

Rechenfälle für das Referenzszenarium (P6 – P10 s. Tab. 4.21 und Tab. 5.3), Einlagerungsvariante B1, Brennelement-Strukturteile

Wird für die Behälter der Brennelement-Strukturteile eine 500 Jahre währende Gasdichtheit angenommen, so muss in Analogie zur Behandlung der defekten POLLUX®-10-Behälter (Rechenfälle Y) ebenfalls eine initiale Ausfallrate angenommen werden. Für 2.620 Behälter der Brennelement-Strukturteile wären dies sechs Behälter. Eine Ortsvariation der Einlagerung dieser Behälter braucht nicht betrachtet zu werden, da nach dem vorliegenden Endlagerkonzept alle Behälter dieses Typs in einer Strecke eingelagert werden. Da der Austrag von C-14 über die Streckenverschlüsse mit der freigesetzten C-14 Menge der Behälter linear korreliert, kann der RGI für die postulierten initial defekten Behälter der Brennelement-Strukturteile einfach berechnet werden. Der RGI für (nicht gasdichte) 2.620 Behälter beträgt im Maximum ca. 110. Für sechs initial defekte gasdichte Behälter wäre der RGI demnach: $\frac{110}{2620} * 6 = 0,252$ und verbleibt somit unterhalb der Grenze von RGI = 1.

Auch für die Rechenfälle P1 – P9 zeigt sich der Einfluss der Korrosionsrate auf den RGI (s. Abb. 5.12 und Abb. A.3). Eine hohe Korrosionsrate (z. B. Rechenfall P6) führt in diesen Fällen zu einer leicht früher einsetzenden, aber insgesamt niedrigeren Frei-

setzung über die Streckenverschlüsse, als ein Rechenfall mit niedrigerer Korrosionsrate (z. B. Rechenfall P9). Dies steht im Gegensatz zu den bereits betrachteten Rechenfällen mit den defekten Brennelement-Behältern (Rechenfälle Y). Gründe sind vermutlich das komplexe Zusammenwirken von Korrosion und Kompaktion (s.a. /KOC 12/) sowie die große Nähe der Einlagerungsstrecke der Brennelement-Strukturteile zum östlichen Streckenverschluss. Im Gegensatz zu den Rechenfällen mit den initial defekten Brennelement-Behältern (Rechenfälle Y) führt hier die Kompaktion in Verbindung mit einer niedrigen Korrosionsrate zu einem Gasdruckaufbau, der ausreicht, um zu frühen Zeitpunkten eine große Menge C-14 zu dem nahe gelegenen östlichen Streckenverschluss zu transportieren. Eine hohe Korrosionsrate führt dagegen dazu, dass sich das C-14 (mit dem Gas) zwar in alle Richtungen (im noch nicht vollständig kompaktierten Salzgrus des Endlagerbergwerks) ausbreitet, aber trotzdem nicht den mittleren Streckenverschluss erreicht, so dass in der Summe weniger C-14 über die Streckenverschlüsse freigesetzt wird.

Rechenfälle für die Einlagerungsvariante AB1 (U1 – U4)

In Abb. 5.13 sind die Ergebnisse für die Einlagerungsvariante AB1 dargestellt (s. Tab. 4.22 und Tab. 5.3). In den Rechenfällen (U1 – U4), in welchen ausschließlich die Freisetzung aus dem Westflügel betrachtet wird, zeigt sich eine starke Abhängigkeit des RGI von der angenommenen Korrosionsrate. In diesen Fällen führt eine hohe Korrosionsrate (Rechenfall U1) zu einem um Größenordnungen höheren RGI ($RGI \approx 2$) als eine leicht geringere Korrosionsrate (Rechenfall U2 mit $RGI \approx 0,002$). Noch geringere Korrosionsraten (Rechenfälle U3 und U4) zeigen einen RGI von $< 1 \cdot 10^{-5}$, der in Abb. 5.13 nicht mehr darstellbar ist. Der Grund für den geringen Aktivitätsfluss ist, dass nur der Gasdruckaufbau infolge einer hohen Korrosionsrate ausreicht, um das C-14 zu frühen Zeitpunkten zum westlichen Streckenverschluss zu transportieren.

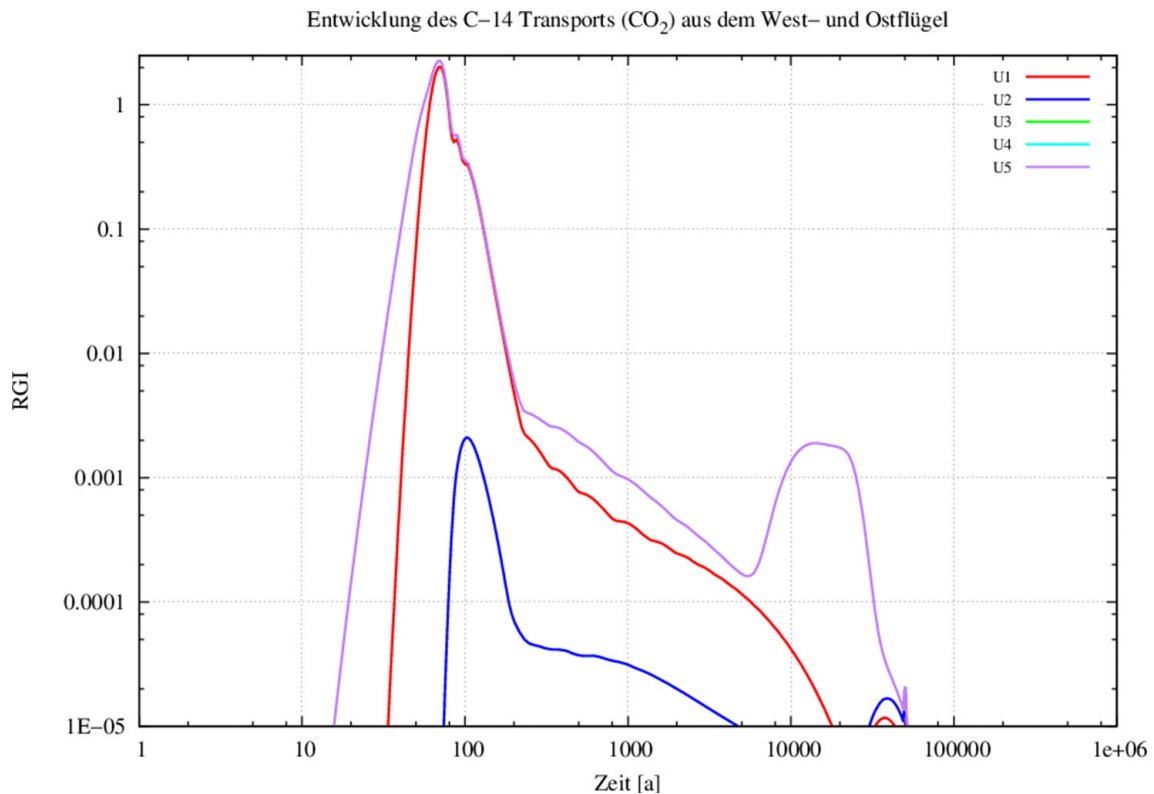


Abb. 5.13 C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 3

Rechenfälle für das Referenzszenarium (U1 – U4 nur Westflügel, U5 beide Flügel, s. Tab. 4.22 und Tab. 5.3), Einlagerungsvariante AB1, West- und Ostflügel

Der Rechenfall U5 zur Einlagerungsvariante AB1 beschreibt modellmäßig eine Kombination des Rechenfalls Y2, welcher für die Einzelbetrachtung des Ostflügels den höchsten RGI für die Brennelement-Behälter beiträgt, mit dem Rechenfall U1, welcher den höchsten RGI für die Einzelbetrachtung des Westflügels zeigt. Im Rechenergebnis führt eine Überlagerung der C-14-Aktivitätsflüsse über die Streckenverschlüsse zu einem RGI von ca. 2,3 (s. Abb. 5.13). Dieser RGI ist etwas geringer als die Summe der RGI der beiden einzelnen Rechenfälle (ca. 2,6). Dies deutet darauf hin, dass ein Teil des am Ort V2 (s. Abb. 4.8) freigesetzten C-14 über den nördlichen Streckenverschluss in den Westflügel transportiert wird. Tatsächlich zeigt sich, dass in den ersten zehn Jahren nach Verschluss des Endlagers Gas vom Ost- in den Westflügel transportiert wird (s. Abb. A.5), bevor sich nach ca. zehn Jahren die Richtung umkehrt. Nach 10 Jahren stellt sich ein erhöhter Druck auf der westlichen Seite des nördlichen Streckenverschlusses ein und dementsprechend kehrt sich die Strömungsrichtung des Gases um und verläuft nun vom Westflügel in den Ostflügel (wie in /KOC 12/ beschrieben).

Rechenfälle für das Isotop I-129

Abb. 5.14 zeigt, dass eine Freisetzung über die Streckenverschlüsse von I-129 (Rechenfälle M1 – M4, s. Tab. 4.23 und Tab. 5.3) als volatile IRF-Komponente aus den POLLUX[®]-10-Behältern erst nach sehr langen Zeiträumen erfolgt und nur geringe RGI (< 0,01) errechnet werden. Auch für Rechenfälle, in denen keine Diffusion betrachtet wurde (M3 und M4), kommt es zu einer geringen Freisetzung in den Infrastrukturbereich nach 100.000 Jahren, da im Vergleich zu den Rechnungen des reinen Lösungspfad (Kap. 5.1) im TOUGH2-Modell ein wenn auch niedriger advektiver Gastransport unterstellt wird. Zu diesem Zeitpunkt ist die Kompaktion des Salzgrusversatzes mit Erreichen der Endporosität von 1 % bereits lange Zeit abgeschlossen, jedoch führt die als Randbedingung gesetzte Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung (s. Kap. 3.3.2), wie auch in /KOC 12/ beschrieben, zu einem langfristigen Druckausgleich im Endlagersystem und damit zu einem Transport des I-129 in den Infrastrukturbereich.

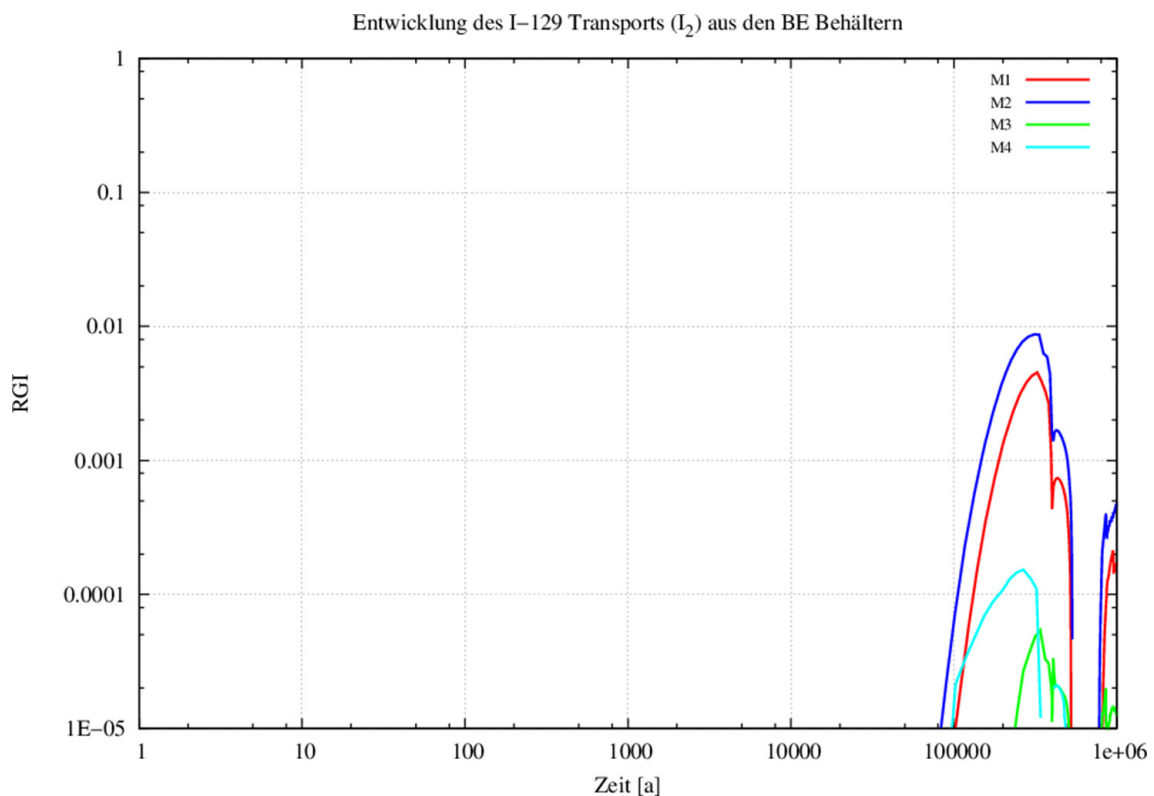


Abb. 5.14 I-129 Freisetzung in den Infrastrukturbereich

Rechenfälle für das Referenzszenarium (M1 – M4, s. Tab. 4.23 und Tab. 5.3), Einlageungsvariante B1, intakte Brennelemente-Behälter

Zusätzlich zum Radionuklidtransport über die Streckenverschlüsse in den Infrastrukturbereich (Ansatzpunkt Begrenzung des ewG) wird auch der Radionuklidtransport

über die untersten Dichtelemente beider Schächte berechnet, um den Einfluss der Infrastrukturbereiche auf den Radionuklidtransport zu überprüfen. Unter der Annahme eines hier abweichenden RGI - Bewertungsaufpunktes (an den untersten Dichtelementen) gibt es für die Rechenfälle des Referenzszenariums keinen Rechenfall in welchem als Ergebnis ein $RGI > 1 \cdot 10^{-20}$ berechnet wird.

5.2.2 Rechenfälle zu den Alternativszenarien

Rechenfälle für Brennelement-Behälter (Y-Z1 – Y-Z8)

In Abb. 5.15 sind die Ergebnisse für die Rechenfälle aus den Alternativszenarien dargestellt, die die POLLUX[®]-10-Behälter im Ostflügel betreffen. Alle ermittelten RGI liegen deutlich unterhalb von eins. In Analogie zu den Rechenfällen für das Referenzszenarium zeigen die Ergebnisse auch in diesen Fällen eine starke Abhängigkeit vom angenommenen Ort der Einlagerung für die initial defekten Behälter (Rechenfälle Y-Z1 – Y-Z4, s. Tab. 4.24 und Tab. 5.3). Es zeigt sich, dass der Rechenfall Y-Z4, in welchem sechs initial defekte Behälter am durch andere Rechenfälle (s. Kap. 4.4.3) ermittelten ungünstigsten Ort V2 (s. Abb. 4.8) eingelagert werden, mit einem Wert von ca. 0,37 den höchsten RGI aufweist (Anmerkung: Für die RGI-Berechnung der Alternativszenarien ändert sich der Bezugswert von 0,01 mSv/a auf 0,1 mSv/a, s. Kap. 2.1).

Die früheste Freisetzung über die Streckenverschlüsse und den zweihöchsten RGI (mit ca. 0,18) zeigt Rechenfall Y-Z6, in welchem das vorzeitige Versagen des Streckenverschlusses „Mitte“ angenommen wurde. Alle anderen Rechenfälle zeigen RGI, die zu jedem Zeitpunkt gleich oder unter den RGI-Werten der vorgenannten Rechenfälle liegen.

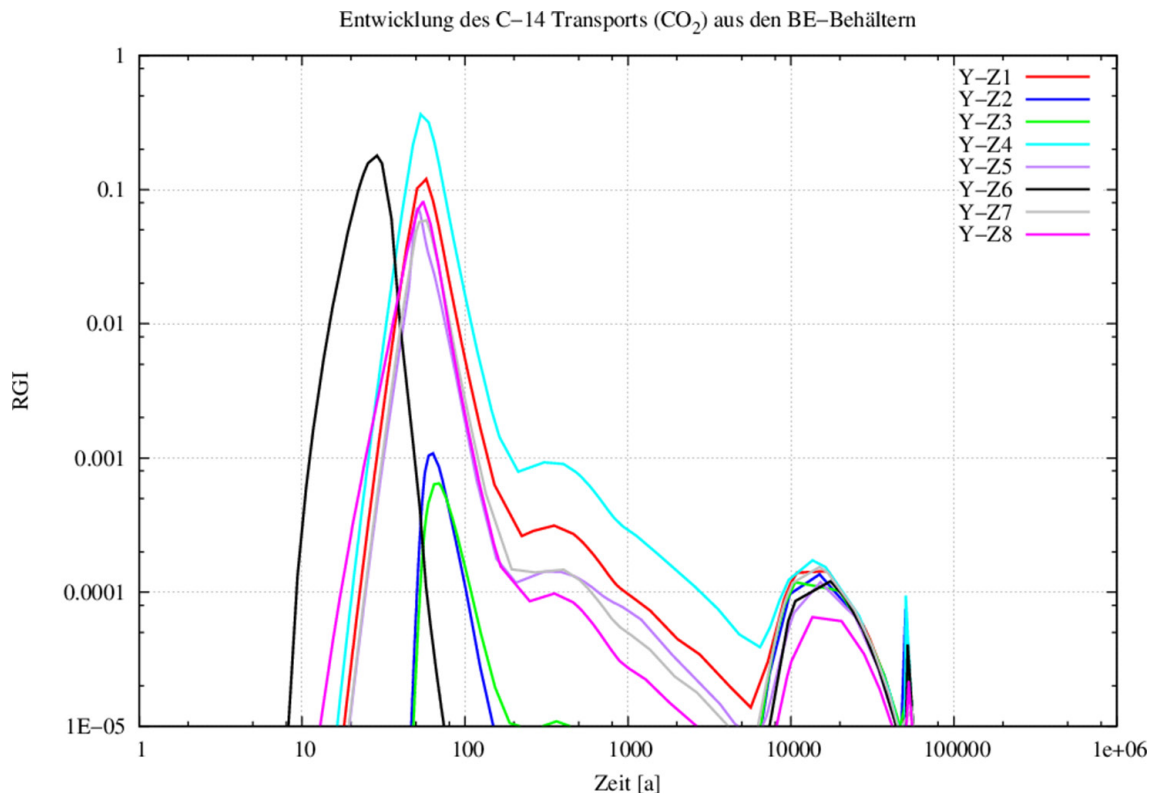


Abb. 5.15 C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 5

Rechenfälle für die Alternativszenarien (Y-Z1 bis Y-Z8 s. Tab. 4.24 und Tab. 5.3), Einlagerungsvariante B1, intakte (500 Jahre gasdichte) und defekte POLLUX[®]-10 Behälter

Abb. 5.16 zeigt die Ergebnisse der Rechenfälle für die Alternativszenarien zur gasförmigen Freisetzung von Radionukliden aus den Brennelement-Strukturteilen (Tab. 4.25 und Tab. 5.3). Auch für diese Rechenfälle liegen alle Werte der RGI über 1, aufgrund der Änderung des Bezugswerts zur RGI-Berechnung (s. Kap. 2.1) aber deutlich niedriger als für die Rechenfälle des Referenzszenariums. Die deutlichste Auswirkung auf die Entwicklung des RGI zu frühen Zeitpunkten hat das Alternativszenarium des vorzeitigen Versagens des Streckenverschlusses „Ost“. Die Ursache dafür liegt in der unmittelbaren Nähe der Einlagerungsstrecke der Brennelement-Strukturteile zu diesem Streckenverschluss.

Analog zu den Rechenfällen des Referenzszenariums führt in den Alternativszenarien eine Optimierung der Behälter hinsichtlich einer Gasdichtheit für 500 Jahre (in der VSG wird damit auch eine Gasdichtigkeit gegenüber CO₂ unterstellt) zu wesentlich geringeren RGI (s. P-Z5 in Abb. 5.16).

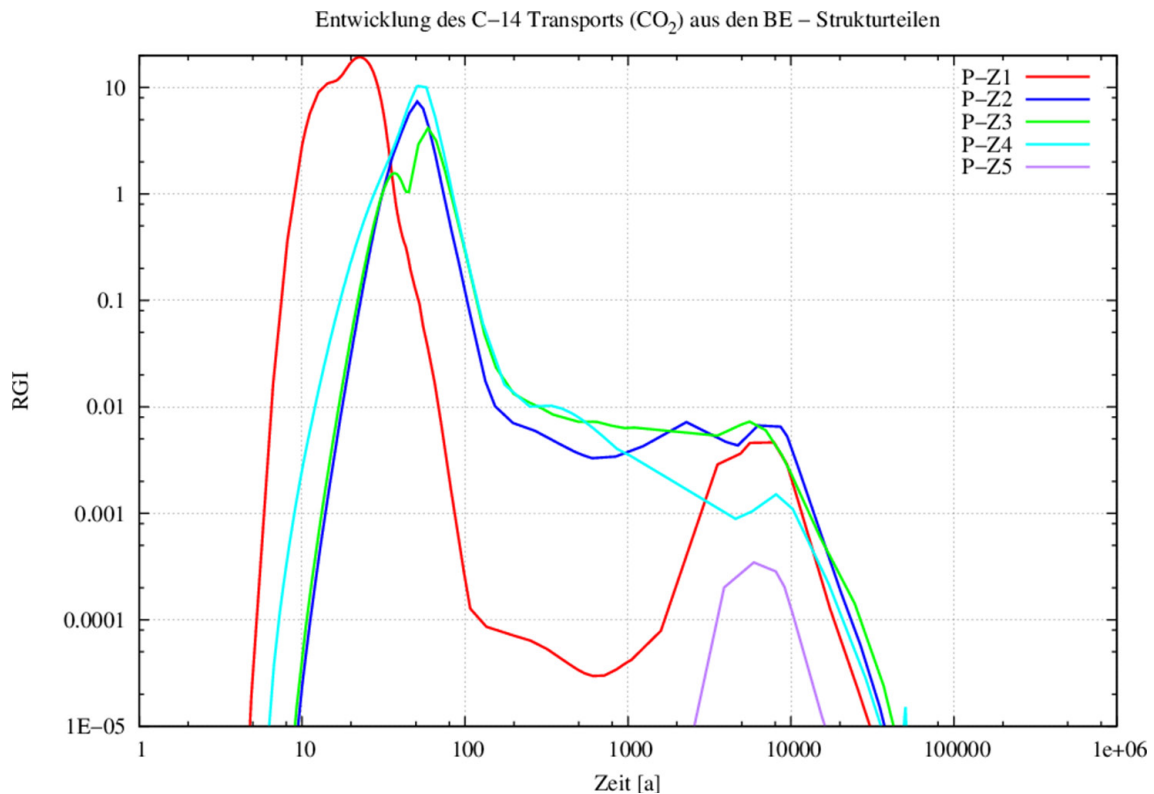


Abb. 5.16 C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 6

Rechenfälle für die Alternativszenarien (P-Z1 bis P-Z5 s. Tab. 4.25 und Tab. 5.3), Einlagerungsvariante B1, Brennelement-Strukturteile

Rechenfälle für die Einlagerungsvariante AB1 (U-Z1 – U-Z6)

Für die Rechenfälle der Alternativszenarien zu Abfällen im Westflügel in Kombination mit dem Ostflügel (Einlagerungsvariante AB1, s. Tab. 4.25 und Tab. 5.3) sind die Ergebnisse in Abb. 5.17 dargestellt. Keiner der ermittelten RGI ist höher als 0,5. Bemerkenswert dabei ist, dass die Rechenfälle U-Z1 (vorzeitiges Versagen des Streckenverschlusses „Ost“) und U-Z4 (vorzeitiges Versagen des Streckenverschlusses „Nord“) kaum Unterschiede bzgl. ihres Freisetzungsverhaltens über die Streckenverschlüsse zeigen. Das deutet bereits darauf hin, dass der primäre volatile C14-Fluss über den westlichen Streckenverschluss verläuft, was durch Abb. A.6 bestätigt wird.

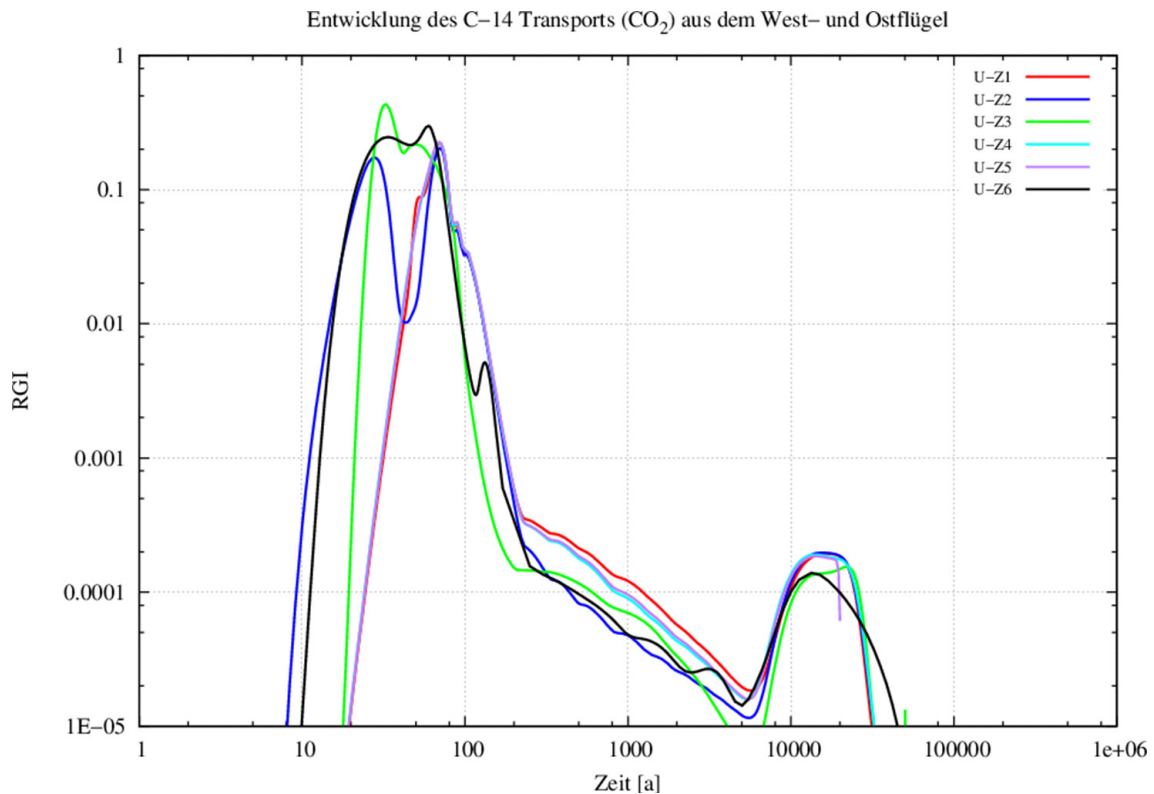


Abb. 5.17 C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 7

Rechenfälle für die Alternativszenarien (U-Z1 bis U-Z4 s. Tab. 4.25 und Tab. 5.3), Einlagerungsvariante AB1, West- und Ostflügel

Die Betrachtung des C-14-Transports über die unteren Dichteelemente beider Schächte (als neue RGI-Bewertungsaufpunkte) zeigt, dass für Rechenfälle Y-Z1 – YZ8, P-Z1 – P-Z5 (Einlagerungsvariante B1) und den Großteil der Rechenfälle für die Einlagerungsvariante AB1 (Rechenfälle U-Z) keine $RGI > 1 \cdot 10^{-20}$ berechnet werden. Die Ausnahme bilden die Rechenfälle U-Z3 und U-Z6, in welchen $RGI < 0,0005$ ermittelt werden (s. Abb. A.7). Interessanterweise wird dieses Ergebnis nicht durch Rechnungen zum Alternativszenarium des vorzeitigen Versagens der Schachtverschlüsse, sondern durch das vorzeitige Versagen des Streckenverschlusses „West“ (U-Z3) und eine hohe Korrosionsrate (U-Z6) hervorgerufen. Der Grund dafür ist, dass bei einem Versagen des Schachtverschlusses ein wenn auch geringer Lösungstransport in das Endlager hinein stattfindet (und nicht hinaus). Andererseits zeigen gerade die Rechenfälle U-Z3 und U-Z6 bereits die höchsten RGI beim Transport in den Infrastrukturbereich (Abb. 5.17) für die Einlagerungsvariante AB1. Die eigentliche Ursache kann nicht endgültig geklärt werden, da anhand eines kombinierten RGI für die Gas- und Flüssigphase, wie er hier verwendet wird, eine detaillierte Analyse des Transportpfades (gasförmig

oder flüssig) nicht stattfinden kann. Aus Zeitgründen konnten detaillierte Analysen in diesem Rahmen nicht erfolgen.

5.2.3 What-if-Rechenfälle

Wie bereits in Kap. 4.4.3.3 erwähnt wurden keine What-if-Rechenfälle betrachtet.

6 Zusammenfassende Ergebnisdarstellung und Bewertung der Umsetzung des Nachweiskonzepts

Im Nachweiskonzept /MÖN 12/ werden auf Basis des Sicherheitskonzeptes die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert, so dass die Anforderungen gemäß /BMU 10/ erfüllt werden. Es erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise, wie im Rahmen des Vorhabens VSG die Sicherheit des Endlagersystems bewertet werden soll. Es werden Kriterien definiert, anhand derer die Ergebnisse der Analysen zu einer Gesamtaussage bewertet sollen. Zur radiologischen Langzeitaussage fordert das Nachweiskonzept

- den Nachweis des Einschusses der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich mittels Freisetzungsanalysen und
- die Einhaltung der radiologischen Schutzziele bei Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Dabei wird zur radiologischen Bewertung der Radionuklidfreisetzung in den Referenzszenarien (wahrscheinliche Szenarien) und in den Alternativszenarien (weniger wahrscheinliche Szenarien) sowohl für den reinen Lösungspfad als auch für den Gaspfad ein vereinfachtes Verfahren nach /MÖN 12/ angewendet. Als Ergebnis der Analysen ist ein Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI) zu berechnen, der das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) im Verhältnis zu einem Freisetzungswert angibt, der als geringfügig angesehen wird /MÖN 12/. Für den Gaspfad errechnet sich dieser Radiologische Geringfügigkeitsindex (RGI) nach einem in der VSG verwendeten Biosphärenmodell.

Daten und Grundlagen der für die Analysen im Rahmen der Arbeiten zum A P10 zusammengestellten Modellparameter und Modellannahmen sind die in der VSG bereitgestellten Beschreibungen des Standorts, des Abfallinventars und der standortspezifischen Endlagerkonzepte. Der FEP-Katalog und die Szenarienentwicklung bilden die Basis für das im AP 10 entwickelte Konzept zur Ableitung von Rechenfällen. Die radiologische Konsequenzenanalyse baut auf Ergebnissen der Integritätsanalysen der geologischen bzw. geotechnischen Barrieren auf und verwendet Ergebnisse der AG Kohlenwasserstoffe und der AG Quellterm als weitere Grundlagen zur Definition der notwendigen Modellrandbedingungen und Modellparameter.

Da Radionuklidfreisetzungen, die sich aus den beschriebenen Rechenergebnissen ergeben, eher von den unterschiedlichen Transportprozessen bzw. den verwendeten Rechenmodellen abhängig sind als von den wahrscheinlichen oder weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems, erfolgt die nachfolgende zusammenfassende Ergebnisdarstellung und Bewertung der Umsetzung des Nachweiskonzepts anhand des reinen Lösungstransportes (MARNIE) und Zweiphasen-Fluidtransportes (TOUGH2).

Auf Basis der Rechenergebnisse, u. a. der durchgeführten What-if-Betrachtungen, erfolgt eine Analyse der Robustheit des Systems. Für die Rechnungen zur Radionuklidfreisetzung werden die Einlagerungsvariante B1 und die Kombination AB1 betrachtet. Die Varianten C und B2 werden wie bei der Integritätsanalyse nicht explizit im Rahmen der durchgeführten Modellrechnungen untersucht. Dennoch ist es möglich, für diese Einlagerungsvarianten Analogiebetrachtungen im Hinblick auf einen möglichen Lösungszutritt zu den Abfällen anzustellen, die in Kap. 6.4 dargestellt sind.

6.1 Lösungstransport

Abb. 6.1 zeigt zusammenfassend das Ergebnis der Berechnungen zum reinen Lösungstransport mit dem Programm MARNIE für das Referenzszenarium und für die Alternativszenarien bzw. von durchgeführten Parametervariationen. Der Code MARNIE gilt für die vorliegende Fragestellung als teilverifiziert (s. Kap. 4.1.3 und /KOC 13/) und entspricht damit den Anforderungen an analytische Methoden zur Nachweisführung. Für das Referenzszenarium werden Rechnungen zum Lösungspfad durchgeführt. Weiterhin werden aufgrund von Parameterungewissheiten auf Basis des Referenzszenariums deterministische Analysen durchgeführt, indem jeweils der Parameterwert in seiner als wahrscheinlich anzusehenden Ausprägung variiert wird. Im Rahmen der Analyse der Alternativszenarien, die die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen bzw. Ausprägungen des Endlagersystems beschreiben, wird die gleiche Herangehensweise verwendet. Durch diese Vorgehensweise werden die Anforderungen an die Nachweisführung zur Analyse der radiologischen Konsequenz für die Referenz- und Alternativszenarien unter Berücksichtigung ihrer Parameterungewissheiten erfüllt. Ungewissheiten bezüglich der Beschreibung der Quellterme (IRF), der Modelle und der Prozesse, z. B. der Salzgruskomaktion, wird durch vereinfachende konservative Annahmen begegnet.

Im Ergebnis dieser Analysen führen alle Rechnungen zum Radionuklidtransport in der Lösungsphase zu einer Null- bzw. quasi Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem RGI gleich 0 (vollständiger Einschluss der Radionuklide). Sowohl für die Rechenfälle des Referenzszenariums als auch für diejenigen der Alternativszenarien mit einer durch /POP 12/ begründeten Restporosität von 1 % finden keine Freisetzungen über die Streckenverschlüsse statt, da keine Lösungen aus dem Infrastrukturbereich zu den Abfällen treten und sich keine durchgehenden Lösungspfade ausbilden können. Die in den Rechnungen berücksichtigten Lösungsmengen in den Abfällen und im Versatz reichen nicht aus, die Behälter zu korrodieren und Radionuklide in Lösung zu bringen. Auch die entsprechend der vorliegenden Ungewissheiten durchgeführten Parametervariationen ändern im Ergebnis diese Grundaussage nicht. Für den Lösungstransport ist somit der vollständige Einschluss der Radionuklide im ewG als gegeben anzusehen.

Die in der Abb. 6.1 rein formal als Ergebnis einer Reihe von Parametervariationen eingetragenen RGI-Werte haben einen deutlichen Abstand (10 Größenordnungen) zum Geringfügigkeitskriterium ($RGI < 1$). Die entsprechenden rechen-technischen Aktivitätsströme der Radionuklide sind so gering – i. d. R. im Nachweiszeitraum von $1 \cdot 10^6$ Jahren kleiner als 10^{-5} Bq/a, dies bedeutet 1 Zerfall in 100.000 Jahren –, dass es sich dabei um reine Rechengrößen zur Darstellung des Ergebnisses der Modellrechnungen handelt.

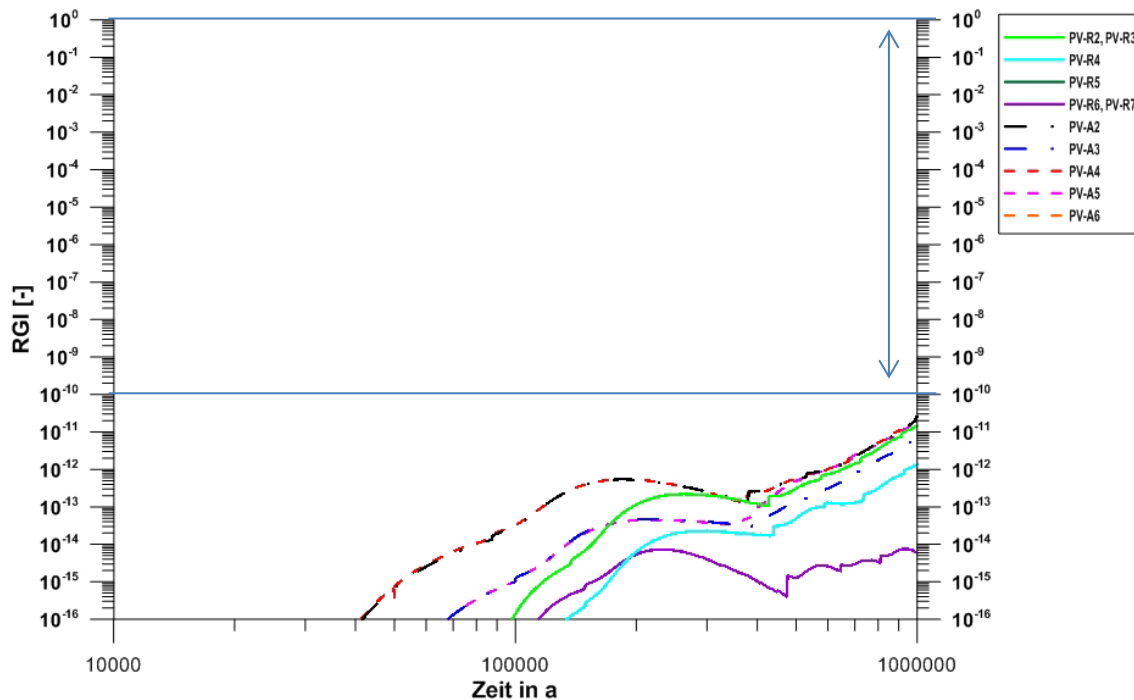


Abb. 6.1 RGI am Streckenverschluss Ost des Ostflügels (Abb. 4.1) als Ergebnis der durchgeführten Radionuklidtransportrechnungen: Parametervariationen des Referenz- und des Alternativszenariums *Schachtverschlussversagen*

6.2 Fluidtransport (Zweiphasenfluss)

Die Anwendung des Zweiphasencodes TOUGH2 für die Analyse des Fluidtransportes über den kombinierten Gas- und Lösungspfad stellt für die gegebene Aufgabenstellung in der VSG, nicht nur wegen der Größe und Komplexität des Modells und seiner Randbedingungen, eine Herausforderung dar:

Endlagerrelevante Prozesse, wie zum Beispiel die Kompaktion des Salzgrusversatzes, die Barrierendegradation und die Behälterkorrosion sind in keinem gängigen Zweiphasenfluss-Rechenprogramm vollständig implementiert. Wie in /NAV 13/ dargestellt, wurde das Rechenprogramm TOUGH2 durch entsprechende Modifikationen in dieser Hinsicht erweitert. Wie in Kap. 4.1.3 erwähnt, wurden auch diese Modifikationen ersten Qualitätssicherungsmaßnahmen unterzogen, wobei betont werden muss, dass diese aufgrund des engen Bearbeitungszeitrahmens im Vorhaben VSG noch nicht vollständig abgeschlossen werden konnten. Weiterhin fehlen für die durchgeführten Modellbetrachtungen abgesicherte Zweiphasenflussparameter, die innerhalb der Rechnungen durch Annahmen bzw. Abschätzungen ersetzt wurden.

Die Analysen haben gezeigt, dass für die Betrachtungen zur Freisetzung der Radionuklide über den Gaspfad eine Vielzahl von Ungewissheiten existiert, die für die Bewertung und Würdigung der berechneten Ergebnisse relevant sind. Diese Ungewissheiten führen in den Analysen einerseits zu einer Überschätzung des aus dem Endlager strömenden Gases und andererseits zur Berechnung einer erhöhten Freisetzung des volatilen Radionuklids C-14 aus den Behältern. Daraus resultiert insgesamt ein stark erhöhter C-14 Austrag aus dem Endlager, dies ist aus einer konservativen Betrachtungsweise heraus beabsichtigt und spielt in der Würdigung der Ergebnisse eine entscheidende Rolle.

Eine weitere modelltechnische Ungewissheit spiegelt sich vor allem in der nicht durchgeführten Berücksichtigung des zeitlichen Ablaufs der Vorgänge (auch in der Betriebsphase vor Verschluss des Schachtes) im Endlagersystem wider. Die in Kap. 5.1.2 präsentierten Ergebnisse wie auch die Analysen in /KOC 12/ zeigen, dass die Kompaktion des Salzgrusversatzes ein wesentlicher Antrieb für den Gastransport ist. Hierzu ist es zwingend erforderlich, in zukünftigen Analysen die sukzessive Einlagerung der Abfälle und das sukzessive Verschließen von Einlagerungsstrecken (bzw. Einlagerungsfeldern) mit Versatz modelltechnisch umzusetzen, so dass die schon in der Betriebsphase einsetzende Kompaktion des Salzgrusversatzes in den Rechnungen berücksichtigt wird. Die Nicht-Berücksichtigung dieser Effekte durch den instantanen Beginn der Freisetzungs-, Gasbildungs- und Kompaktionsprozesse mit dem Schachtverschluss führt in den Rechenergebnissen zu einer massiven Überschätzung der errechneten Aktivitätsströme von volatilen Radionukliden über den Gastransport aus dem Endlager in der frühen Nachverschlussphase.

Der zweite wesentliche Antrieb für den Gastransport ist die Gasbildung durch Korrosion der Behälter. Die Korrosionsrate wurde in den Rechnungen über fünf Größenordnungen variiert. Dies spiegelt die Ungewissheit über die tatsächlichen Korrosionsvorgänge bei sehr geringen Lösungssättigungen wider. Nahezu alle initial verfügbaren Lösungen in den Einlagerungsfeldern werden als verfügbar für die Korrosion angenommen. Die Auswirkungen der Gasbildung durch Korrosion der Behälter im Zusammenhang mit der Kompaktion des Salzgrusversatzes sind komplex und verursachen jeweils unterschiedliche Strömungs- und Druckverhältnisse im Endlager. Die auf Basis dieser komplexen Vorgänge induzierten Transportvorgänge von volatilen Radionukliden berechneten Aktivitätsströme über die Streckenverschlüsse führen langfristig zu berechneten RGI-Werten, die unabhängig von der Korrosionsrate meist unterhalb von 1 bleiben. Unter der Maßgabe der in der VSG verwendeten Ansätze und Annahmen

kann dies als Indikator für die Robustheit des Endlagersystems in der Langzeitphase verwendet werden. Gleichzeitig behindert die Ungewissheit, die durch die modelltechnischen Vereinfachungen für die Nachbetriebs- und frühe Nachverschlussphase hervorgerufen werden und rechnerisch zu Überschreitungen des Geringfügigkeitsindex führen können, letztlich auch eine zielgerichtete Optimierung des Endlagerdesigns, da nicht klar ist, ob eine Optimierung mit den vorliegenden Ergebnissen begründet werden kann oder worin Optimierungsziele bestehen könnten.

Die Ungewissheit über die volatile Freisetzung des C-14 und I-129 aus den Behältern manifestiert sich in der in Kap. 4.2.5 dargestellten Annahme einer instantanen und vollständigen Freisetzung des IRF-Anteils trotz des geringen Lösungsdargebots. Diese Annahme ist gleichbedeutend mit dem sofortigen „Verlust“ der Behälter ohne Berücksichtigung einer langsamen durch die Korrosionsraten bestimmten Freisetzungsrates. Weiterhin wird außer Acht gelassen, dass nach wenigen Jahren der Gasinnendruck der Brennelement-Behälter (durch die dort stattfindende Korrosion) kleiner ist als der Außendruck (hervorgerufen durch die Salzgruskompression). Bei der Annahme der vollständigen Umsetzung der im POLLUX[®]-10-Behälter verfügbaren Lösungsmenge (60 g H₂O entsprechen ca. 3,37 mol H₂O), entsteht nur wenig CO₂-Gas (maximal 1,69 mol, dies entspricht einer Volumenzunahme von ca. 44 l bei 38 °C), welches den Innendruck im Behälter nur wenig erhöht, so dass möglicherweise nach Verlust der Behälterintegrität zunächst Gas in die Behälter gepresst würde.

Auch ohne Berücksichtigung dieses Effektes wird das C-14 in Realität nicht instantan und vollständig in Form von CO₂ freigesetzt, sondern als Rate (wahrscheinlich auch anderer Gase) durch ein entsprechendes „Leck“ am Behälter über einen Zeitraum und durch chemische Wechselwirkungen langsamer bzw. in einem geringeren Maße freigesetzt. Dabei ist die zur Entstehung des Lecks notwendige Lösungsmenge (von innerhalb und außerhalb des Behälters) im Grunde genommen bereits verbraucht. Es wurde aber aufgrund der Ungewissheit der detaillierten Prozessabläufe wiederum konservativ angenommen, dass das entstandene CO₂-Gas den vollständigen volatilen IRF-Anteil an C-14 enthält und transportiert werden kann (auch in der danach eigentlich nicht mehr vorhandenen flüssigen Phase).

Letztlich beruht die Menge der IRF für alle Abfallarten, vor allem der volatile Anteil, auf Modellvorstellungen und Abschätzungen, die im Rahmen der Arbeiten zum AP 10 entwickelt bzw. getroffen werden. Insbesondere für die Abfälle im Westflügel ist sie nicht bekannt.

Für zukünftige Analysen ist deshalb dringend erforderlich, dass Ungewissheiten zu diesen Prozessen durch zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeit abgebaut werden und dadurch realitätsnäher in Rechenmodelle umgesetzt werden können.

Vor dem Hintergrund dieser zahlreichen Ungewissheiten ist die notwendige Bewertung des Systems anhand eines einheitlichen Indexes (des summierten RGI von Flüssig- und Gasphase) letztlich stark vereinfachend und spiegelt nicht die real denkbare Freisetzung von C-14 über die Streckenschlüsse wider. Schon alleine aus diesem Grund sind die errechneten RGI kein Maß für eine realitätsnahe radiologische Belastung, sondern reine Bewertungsgrößen.

Gerade aufgrund dieser in den Analysen der VSG erforderlichen Vereinfachungen und Annahmen zeigt sich jedoch die Notwendigkeit, die Prozesse rund um den Gaspfad im Rahmen weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Detail zu untersuchen. Es wird in diesen Analysen deutlich, dass auch bei einer berechneten Null-Emission aus dem reinen Lösungspfad eine solche Null-Emission bzgl. des Gaspfades, also ein vollständiger Einschluss der Radionuklide innerhalb des ewG, nicht zweifelsfrei zu zeigen ist.

Selbst vor dem Hintergrund der extremen Konservativität der Rechnungen wird in weit aus den meisten Rechenfällen der sichere Einschluss der Radionuklide über den Gaspfad gezeigt. In den Fällen, in denen dies nicht gezeigt wird, führt eine einfache Optimierung des Endlager- oder Behälterdesigns bereits dazu, dass der sichere Einschluss gewährleistet werden kann.

Die Anforderung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für die radiologische Langzeitaussage, am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die potenzielle Freisetzung von volatilen Radionukliden für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien zu betrachten, kann als erfüllt angesehen werden. Jedoch kann für die erfolgten Modellrechnungen zum Gaspfad die Aussagesicherheit einer quantitativen Bewertung der radiologischen Konsequenz in Form des Radiologischen Geringfügigkeitsindex (RGI) in der frühen Nachverschlussphase aufgrund der großen vorhandenen Ungewissheiten nur als gering eingestuft werden.

6.3 Robustheit der Modellrechenergebnisse (What-if-Betrachtungen) Behandlung unwahrscheinlicher Entwicklungen

What-if-Betrachtungen basieren auf unwahrscheinlichen Entwicklungen, die durch die Wahl unwahrscheinlicher FEP oder unwahrscheinlicher Ausprägungen von FEP beschrieben werden. Nach /BMU 10/ wird ihr Auftreten am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet. Für die technischen und geotechnischen Komponenten beschreiben sie Zustände und Entwicklungen, die durch zu treffende Maßnahmen praktisch ausgeschlossen werden können, wie etwa das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten. In den Rechenfällen werden diese Zustände und Entwicklungen über die Parameterwertwahl oder geänderte Randbedingungen betrachtet, die außerhalb für möglich erachteter Bandbreiten liegen. Die Betrachtung dient zum einen zum Verständnis des Endlagersystemverhaltens und zum anderen zur Prüfung der Robustheit der Sicherheitsaussage, welche auf Basis der wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklung des Systems getroffen wird. Des Weiteren können sie für Optimierungsmaßnahmen z. B. für das Endlagerkonzept herangezogen werden. In den Sicherheitsanforderungen des BMU werden für unwahrscheinliche Entwicklungen keine Werte für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt. Die Angabe eines RGI oder eines entsprechenden Indikators, als Interpretation für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau, erfolgt daher in den entsprechenden Analysen wenn überhaupt nur zu Vergleichszwecken.

In den What-if-Analysen der Einlagerungsvariante B1 zum Lösungspfad (Kap. 5.1.3) auf Basis des Referenzszenariums und des Alternativszenariums *Schachtverschlussversagen*, bei denen zusätzliche unwahrscheinliche Ausprägungen von FEP durch eine entsprechende Wahl von Parametern (z. B. Diffusionskonstante und integrale Schachtverschlusspermeabilität, deren Werte über die wahrscheinliche bzw. weniger wahrscheinliche Bandbreite hinausgehen) kombiniert werden, verhält sich das Modell robust.

Auch ein äußerst unwahrscheinliches instantanes Versagen der Dichtelemente in beiden Schächten, resultierend in einer unrealistisch erhöhten Permeabilität von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, führt bei schneller Kompaktion zu keinem erhöhten Lösungszutritt aus dem Infrastrukturbereich zu den Abfällen. Selbst unter Berücksichtigung dieser unwahrscheinlichen Annahmen bleiben die Freisetzungen über den Lösungspfad geringfügig und zeigen die Robustheit des Systems gegenüber Parameteränderungen auf. Jedoch

können aus den Ergebnissen Optimierungsvorschläge für das Endlagerdesign abgeleitet werden, z. B. eine Verlagerung der Behälter der Strukturteile in ein Streckenverschluss-fernes Einlagerungsfeld bzw. eine Verbesserung der Behälterintegrität hinsichtlich einer Gasdichtigkeit.

Vor dem Hintergrund, dass für zahlreiche Parameter und Prozesse nur Daten und Abschätzungen mit einer großen Ungewissheit vorliegen, wird in den Analysen zum Gaspfad auf eine Definition von What-if-Rechenfällen verzichtet. Die Ungewissheiten sowohl in der Annahme bzw. Vereinfachung von Prozessabläufen in den Modellen als auch in der Abschätzung der verwendeten Zweiphasenfluss-Parameter in den Rechnungen sind schwer zu quantifizieren. Sie werden z. T. schon durch die Parameterbandbreiten, die für die Rechenfälle des Referenz- und der Alternativszenarien verwendet wurden, abgedeckt. Die in den Zweiphasenflussrechnungen verwendeten Modellannahmen führen zu einer Überschätzung des aus dem Endlager strömenden Gases und zu einer erhöhten Radionuklidfreisetzung über den Gaspfad.

In Anbetracht der Konservativitäten, die durch die Parameter- und Randbedingungs-wahl in den Rechnungen begründet sind, zeigen die Rechnungen für eine spätere Nachverschlussphase (> 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers) ein robustes Verhalten des Endlagers gegenüber einem Fluidtransport und damit gegenüber einer Freisetzung von Radionukliden über die Streckenverschlüsse. In den weitaus meisten Rechenfällen konnte der sog. sichere Einschluss der Radionuklide über den Gaspfad gezeigt werden. In einer frühen Nachverschlusszeit (< 500 Jahre) werden die ablaufenden Prozesse durch notwendige Modellannahmen bestimmt, die durch die Ungewissheiten der Parameter, aber auch durch das noch nicht vollständig ausgereifte Nachweisinstrumentarium begründet sind. Hier erweisen sich die vorliegenden Endlagerkonzepte und der Kenntnisstand zu den frühzeitig ablaufenden Prozessen als weniger robust. Dies ist einerseits durch die mangelnde Kenntnis der initialen Feuchtigkeitsmengen in den Behältern und den zeitlichen Abläufen der Korrosionsprozesse begründet, andererseits führt die Unkenntnis der schnell freigesetzten Radionuklidanteile (IRF) in die Gasphase zu Modellannahmen, die eine erhebliche Überschätzung der Freisetzung darstellen.

In den Rechenfällen, in denen der sog. sichere Einschluss der Radionuklide über den Gaspfad quantitativ nicht gelingt, führen einfache Optimierungsansätze zum Endlager- oder Behälterdesign bereits dazu, dass der sichere Einschluss aufgezeigt werden kann. Daher ist es für zukünftige Analysen dringend erforderlich, die Ungewissheiten

hinsichtlich Prozessen und Parametern durch noch zu erbringende Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu beseitigen und realitätsnäher in Rechenmodelle umzusetzen.

6.4 Analogiebetrachtungen zu den anderen Einlagerungsvarianten

Da jedes der Referenzszenarien auf dem gleichen Ausgangszustand des Endlagersystems unter Einbeziehung der zugrunde liegenden Einlagerungsvariante unmittelbar nach dem vollständigen Verschluss des Grubengebäudes beruht, ist eine durchgehende Betrachtung der Einlagerungsvariante C und B2 nur dann notwendig, wenn sich hinsichtlich der Entwicklungsmöglichkeit eine Radionuklidmobilisierung und ein daraus möglicherweise resultierender Transport von Radionukliden ergeben kann. Eine Änderung auf Basis der spezifischen Annahmen (dazu siehe /BEU 12/) ergibt sich damit nur, wenn ein möglicher Lösungszutritt zu den Abfällen aufgrund der Änderung von spezifischen Annahmen der Einlagerungsvariante zu unterstellen ist. Wie die Ergebnisse der Rechnungen zu dem Referenzszenarium und den Alternativszenarien der Einlagerungsvariante AB1 bzw. der Teilvariante B1 zeigen, ist dies auch bei ungünstiger Parameterwahl nicht der Fall. In einer Differenzbetrachtung werden nachfolgend die Varianten C und B2 verbal argumentativ im Hinblick möglichen Lösungszutritts zu den Abfällen bewertet.

6.4.1 Einlagerungsvariante C: Bohrlochlagerung

Die Einlagerungsvariante C „Bohrlochlagerung“ wurde im Laufe der VSG hinsichtlich ihrer Machbarkeit, eine Rückholung der Abfälle zu ermöglichen, untersucht. Diese Arbeiten wurden mit einem Einlagerungskonzept erst zur Mitte der Projektlaufzeit detailliert vorgestellt.

In der Einlagerungsvariante C ist das Konzept zum Bau der Schacht- und Streckenverschlüsse und zur Auffahrung der Infrastrukturbereiche sowie das entsprechende Verfüll- und Verschlusskonzept weitgehend identisch mit dem der bereits ausführlich in Analysen behandelten Variante B1. Das in Kap. 5.1 sowohl für das Referenz- als auch für das Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* ausführlich beschriebene und mit dem Programm MARNIE berechnete Zutrittsverhalten von Lösungen in den Infrastrukturbereich und in die angrenzenden Streckenverschlüsse kann folglich auf die Einlagerungsvariante C übertragen werden.

Erst nach vollständiger Lösungssättigung des Infrastrukturbereiches und damit erfolgter Anbindung an das Deckgebirge steht an den Streckenverschlüssen mit dem hydrostatischen Druck ein Fluidruck an, welcher eine größere Lösungsmenge über die Streckenverschlüsse in die Richtstrecken transportieren kann. Der früheste Zeitpunkt einer solchen Anbindung an das Deckgebirge wird im Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* mit 1.100 Jahren errechnet (Kap. 5.1.2.1). Die Richtstrecken werden auch im Fall der Bohrlochlagerung mit angefeuchtetem Salzgrus versetzt. Selbst unter der Annahme der „langsamen“ Kompaktionsgeschwindigkeit und der Kategorie „feucht/kalt“ für die Kompaktionsberechnung, wie im Rechenfall PV-R1 zum Referenzszenarium (Kap. 5.1.1.2) und PV-A1 zum Alternativszenarium *Schachtverschlussversagen* (Kap. 5.1.2.2) beschrieben, ist der Salzgrusversatz der an die Streckenverschlüsse angrenzenden Richtstrecken nach spätestens 610 Jahren bis zu einer Restporosität von 1 % kompaktiert, d. h. auch unter der Annahme der ungünstigsten Parametervariationen nach weniger als 1.100 Jahren. Da bei dieser Porosität nach /POP 12/ keine zusammenhängenden Porenräume mehr vorliegen, findet Advektion von Lösung nicht mehr statt. Folglich kann auch im Falle der Bohrlochlagerung keine Lösung in die Richtstrecken und damit auch nicht in die Einlagerungsfelder vordringen. Es erfolgt somit keine Freisetzung von Radionukliden in die Lösungsphase. Dies führt schließlich hinsichtlich des Radionuklidtransportes in der Lösungsphase zu einer Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem RGI = 0.

Für den Gaspfad sind keine vereinfachten Analogieschlüsse möglich, obwohl der Westflügel des Endlagerbergwerks unverändert bleibt. Die Einzelergebnisse im Hinblick auf den Fluidruck und die Fließwege im Westflügel würden somit ähnlich auch für die Einlagerungsvariante AC gelten.

Wie bereits in /KOC 12/ dargestellt, ist für den Gaspfad ein mit dem Streckenlagerungskonzept vergleichbares Verhalten zumindest fraglich, da es eine Reihe von Prozessen gibt, die im Endlagerbergwerk für die Variante C deutlich andere Auswirkungen haben als für die Variante B1.

Dies betrifft:

- das Verhalten der gasförmigen Fluide im Bohrloch (verbleiben sie im Bohrloch oder sind sie mobil im Endlager),
- die Auswirkungen des Fluiddrucks auf die Bohrlochverschlüsse,

- die Betrachtung der Gasinfiltration ins Wirtsgestein um die Bohrlöcher herum und
- die thermomechanischen Auswirkungen der Bohrlochlagerung auf die Konvergenz und damit auf die Kompaktion des Salzgrusversatzes.

Für eine Abschätzung sind die betrachteten Prozesse vor allem in ihrer Interaktion zu komplex. Für verlässlichere Aussagen sind Berechnungen notwendig.

6.4.2 Einlagerungsvariante B2: Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Für den reinen Lösungspfad gelten ähnliche Analogieschlüsse wie bei der Bohrlochlagerung. Da das Verschlusskonzept analog zu Einlagerungsvariante B1 ist, kann auf die entsprechenden hydraulischen Ergebnisse zurückgegriffen werden. Bei der Betrachtung des Gaspfades kann auf die durchgeführten Rechnungen zur Einlagerungsvariante AB1 verwiesen werden. Eine Gesamtabstimmung des Ergebnisses der Bewertungsgröße RGI fällt schwer, da das gasförmig freigesetzte Radionuklidinventar der IRF eines Transport- und Lagerbehälters (CASTOR[®]) für die Variante B2 noch zu bestimmen wäre. Für den reinen Gastransport werden die Ergebnisse hauptsächlich vom angenommenen Restfeuchtegehalt der verwendeten Behälter abhängen. Die vorliegenden Informationen deuten auf keine wesentliche Änderung des Systemverhaltens hin⁶. Weitere detaillierte Untersuchungen konnten aus den o. a. Zeitgründen nicht durchgeführt und sind späteren F&E-Arbeiten vorbehalten.

⁶ Die von /DÖR 12/ aktualisierten Restfeuchtemengen für die CASTOR[®]-Behälter betragen das Doppelte der POLLUX[®]-Behälter (120 g). Dies entspricht etwa nur 0,33 % der zur Korrosion beitragenden Restfeuchtemasse im Vergleich zu ca. 0,165 % beim POLLUX[®]-Behälter. Dies hätte dann maximal eine äquivalente Erhöhung des entsprechenden Anteils am entstehenden und danach ausströmenden Gas über die Streckenverschlüsse zur Folge.

7 Schlussfolgerungen

Das Ziel der radiologischen Konsequenzenanalyse im Vorhaben VSG ist neben der Gewinnung eines Systemverständnisses zur Hydraulik und zum Radionuklidtransport im Endlagerbergwerk die Erarbeitung einer radiologischen Langzeitaussage nach den vereinfachten Nachweisverfahren aufgrund potenzieller Freisetzungen von Radionukliden aus dem Endlager sowohl für das erwartete Systemverhalten in der Langzeitphase als auch für die aufgrund von Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems in der Szenarientwicklung systematisch abgeleiteten Szenarien.

Die zusammenfassende Ergebnisdarstellung und Würdigung der Ergebnisse zeigt, dass das Nachweiskonzept und der im Nachweiskonzept geforderte Umgang mit Ungewissheiten umgesetzt wurden. Vorbehaltlich der getroffenen Annahmen (u. a. Prämissen) konnte für die Freisetzung gelöster Radionuklide auf Basis des vereinfachten Nachweisverfahrens gezeigt werden, dass der RGI immer kleiner 1 ist. Für gasförmige freigesetzte Radionuklide erfolgte vorbehaltlich der Modellungsgewissheiten dies nur unter der Voraussetzung des Vorliegens gasdichter Behälter für Brennelement-Strukturteile.

Im Ergebnis der Analysen des Einphasen-Lösungstransportes mit dem Programm MARNIE zu den als relevant identifizierten Szenarien wird gezeigt, dass sowohl im Referenzszenarium als auch für die Alternativszenarien der vereinfachte radiologische Nachweis geführt werden kann. Die Ergebnisse der Rechnungen zur Lösungsphase führen zu einer Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse (Annahme als Grenze des ewG) und damit zu einem $RGI = 0$ (vollständiger Einschluss der Radionuklide). Auch Analysen mit Variation der Parameter ändern dieses Systemverhalten nicht. Somit ist der vollständige Einschluss der Radionuklide im ewG im Sinne des Nachweiskonzeptes /MÖN 12/ als erfüllt anzusehen. Selbst unter Berücksichtigung von unwahrscheinlichen Annahmen in den What-if-Analysen zum Lösungspfad bleiben die Freisetzungen geringfügig und zeigen die Robustheit des Systems gegenüber Parameteränderungen auf. Jedoch konnten aus den Ergebnissen Optimierungsvorschläge für die Steigerung der Robustheit des Einlagerungsvariante AB1 (Streckenlagerung) abgeleitet werden.

Die Untersuchung des Einflusses der Parameter- und Datenungleichheiten auf die Analyseergebnisse ergaben einen großen Einfluss folgender Parameter auf den Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche:

- der Druck an der infrastrukturseitigen Stirnfläche des Streckenverschlusses,
- die Permeabilität und Porosität der Streckenverschlüsse,
- die zeitliche Entwicklung der Porosität/Permeabilität des Salzgrusversatzes in den Einlagerungsbereichen, insbesondere in den Richtstrecken unter Einfluss von Feuchte und Temperatur,
- die erreichbare Restporosität des kompaktierten Salzgrusversatzes.

Der Einfluss der sonstigen Parameter auf den Lösungsfluss ist im Vergleich zu den obigen vernachlässigbar klein. In deterministischen Analysen wurden alle o. g. wesentlichen Parameter variiert und kombiniert, um ihren Einfluss auf die eingeströmte Lösungsmenge zu ermitteln. Die den Lösungstransport und den Radionuklidtransport bestimmenden wesentlichen Parameter und Daten wurden in Bandbreiten variiert, die den wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Ausprägungen entsprachen. Die Analyseergebnisse wiesen allesamt rechnerische Freisetzungen von Radionukliden aus, die praktisch null bedeuteten. Es wurden keine Parameterkombinationen erkannt, die ein grundlegend anderes Verhalten erkennen ließen. Dies kann damit begründet werden, dass die das System bestimmenden Parameter in einer zeitlichen Staffelung wirksam werden, so dass sie linear auf das Analyseergebnis wirken. Hieraus konnte gefolgert werden, dass weitere Unsicherheitsanalysen für das Endlagermodell keine weiteren Erkenntnisse liefern konnten. Dies gilt auch für probabilistische Unsicherheitsanalysen. Die Einphasenanalyse zum Lösungstransport in der Einlagerungsvariante B1 mit dem Programm MARNIE ergab sehr robuste Ergebnisse.

Die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Zweiphasen-Transportanalysen mit dem Programm TOUGH2 für den Gaspfad sind differenzierter. Zur Bewertung der Langzeitsicherheit für gasförmig (volatil) freigesetzte Radionuklide liegen in /BMU 10/ und /MOE 12/ zum vereinfachten Nachweisverfahren keine Ausführungen vor. Daher musste in der VSG ein zum Lösungstransport adäquates Verfahren für volatil freigesetzte Radionuklide entwickelt werden. Die vorgelegte Rechenvorschrift zur Bestimmung des RGI ist ein für die VSG entwickeltes Verfahren, die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ bezüglich des vereinfachten Nachweises auf den Gaspfad zu übertragen. Künftige F&E-Arbeiten auf diesem Gebiet könnten durchaus zu anderen RGI-Formulierungen führen. Für eine Freisetzung von gasförmigen Radionukliden aus

den Abfällen in der frühen Nachverschlusszeit kann sowohl für das Referenzszenarium als auch für die Alternativszenarien der vereinfachte Nachweis nur dann geführt werden, wenn für die endgelagerten Strukturteile eine Optimierung hinsichtlich der Einlagerung in gasdichte Behälter unterstellt wird. Im Falle der ursprünglich vorgesehenen Lagerung der Strukturteile ohne weitere Anforderung an die Konditionierung und Verpackung nahe dem Streckenverschluss Süd wird die Bemessungsgröße RGI in der frühen Nachverschlussphase in allen Rechenfällen überschritten. Die vorliegenden Einlagerungskonzepte zur Lage und Verpackung der Brennelement-Strukturteile und der Kenntnisstand zu den frühzeitig ablaufenden Prozessen in den Brennelementbehältern erweisen sich hier als weniger robust. Dies ist einerseits durch die mangelnde Kenntnis der initialen Restfeuchtemengen in den Behältern und den zeitlichen Abläufen der Korrosionsprozesse begründet, andererseits führt die Unkenntnis zur Mobilisierung der IRF aus den Brennelement-Strukturteilen und der Übergang in die Gasphase zu Modellannahmen, die eine erhebliche Überschätzung der Freisetzung darstellen. Für die Bewertung des Gaspfades ist anzumerken, dass die Belastbarkeit der Ergebnisse der Zweiphasen-Transportanalysen nicht angegeben werden kann. Die Ungewissheiten bzgl. der Prozesse und deren modelltechnischer Beschreibung erlauben deshalb lediglich den Hinweis, dass der Transport gasförmiger Radionuklide für einen zukünftigen Sicherheitsnachweis bedeutsam werden kann und hierzu weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf gefordert ist. Im anschließenden Kapitel wird der identifizierte F&E-Bedarf beschrieben.

In einer Differenzbetrachtung wurden die Einlagerungsvarianten C und B2 verbal argumentativ im Hinblick auf einen möglichen Lösungszutritt zu den Abfällen bewertet. Insbesondere die Einlagerungsvariante C wurde im Laufe der VSG hinsichtlich ihrer Machbarkeit, eine Rückholung der Abfälle zu ermöglichen, untersucht. Diese Arbeiten wurden mit einem Einlagerungskonzept erst zur Mitte der Projektlaufzeit vorgestellt. Sowohl das für das Referenz- als auch für die Alternativszenarien berechnete Zutrittsverhalten von Lösungen in den Infrastrukturbereich und in die angrenzenden Streckenverschlüsse kann auf die Einlagerungsvarianten B2 und C übertragen werden. Erst nach vollständiger Lösungssättigung des Infrastrukturbereiches und damit erfolgter Anbindung an das Deckgebirge steht an den Streckenverschlüssen mit dem hydrostatischen Druck ein Fluidruck an, welcher eine größere Lösungsmenge über die Streckenverschlüsse in die Richtstrecken transportieren kann. Der früheste Zeitpunkt einer solchen Anbindung an das Deckgebirge erfolgt erst, nachdem der Salzgrusversatz auf eine Restporosität von 1 % kompaktiert wurde, bei dem nach /POP 12/ keine zusammenhängenden Porenräume mehr vorliegen und kein Lösungstransport mehr

stattfindet. Weitere detaillierte Untersuchungen (spezifisches Endlagermodell) zu diesen Einlagerungsvarianten konnten in der radiologischen Konsequenzenanalyse aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden und sind späteren F&E-Arbeiten vorbehalten.

8 Zusammenfassung des identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

Während der Bearbeitung des AP 10 in dem Vorhaben VSG wurden zahlreiche Bereiche identifiziert, für die ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Die Notwendigkeit und die Begründung dieser Notwendigkeit werden zum größten Teil bereits in den vorhergehenden Kapiteln dargelegt.

In der Beschreibung der Ergebnisse der Analysen zum Gas- und Lösungstransport wird an einigen Stellen deutlich, dass das Prozessverständnis der Vorgänge im Endlagersystem nicht ausreicht, um sie adäquat in die Berechnungsprogramme zu implementieren und damit die Aussagesicherheit zu erhöhen. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht u. a. in einem verbesserten Prozessverständnis, um die vorgenommenen Vereinfachungen in den Analysen zu reduzieren und damit gegebenenfalls Konservativitäten abzubauen

Im Nachfolgenden werden die wichtigsten Aspekte des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs dargestellt. Dabei sind eine Reihe von Punkten schon in der Beschreibung des F&E-Bedarfs, der sich aus den Arbeiten zu Integritätsanalyse der geologischen Barriere ergibt, in /KOC 12/ enthalten. Dieser gemeinsame F&E-Bedarf bezieht sich zum einen auf das Recheninstrumentarium – in den Analysen zum Gasdruckaufbau im Grubengebäude wird ebenfalls das Programm TOUGH2 verwendet – zum anderen auf gemeinsame Prozessabläufe insbesondere zum Salzgrusversatz. Sie werden hier nur kurz aufgegriffen und durch Verweise auf die ausführlichen Beschreibungen im Anhang A.9 kenntlich gemacht.

In der VSG werden aus den identifizierten FEP (Features, Events, Processes) Szenarien abgeleitet. Derzeit fehlt eine Methodik, aus den entwickelten Szenarien Rechenfälle abzuleiten, die für die Szenarien abdeckend sind. Eine weitere Herausforderung ist es, die Zahl der Rechenfälle auf ein praktikables Maß zu begrenzen.

Bei der in der VSG verwendeten Methode der Szenarientwicklung ist die Zulässigkeit und auch die Anwendbarkeit (insbesondere von Sensitivitätsanalysen) auf Modelle, wie sie in der VSG verwendet wurden, zu prüfen, da diese sich deutlich von den in anderen Ländern verwendeten unterscheiden. Das Zusammenspiel von probabilistischen Methoden, der in der VSG verwendeten Methode der Szenarientwicklung und die

Angabe von Wahrscheinlichkeitsdichten zu wahrscheinlichen bzw. weniger wahrscheinlichen FEP-Ausprägungen sind noch Gegenstand der Diskussion und durch zukünftige F&E-Arbeiten zu untersuchen (s. Anhang A.9: AP 10 – 01).

Die Eigenschaften des Salzgrusversatzes weisen durch die Anforderung, den langfristigen Einschluss der Radionuklide in den Einlagerungsbereichen zu gewährleisten, einen hohen Stellenwert im Sicherheitskonzept der VSG auf. Der Zeitverlauf ihres Kompaktionsverhaltens insbesondere hinsichtlich kleiner Porositäten bis zu einer vernachlässigbaren Restporosität von $1 \pm 1 \%$ ist derzeit nur unzureichend quantifiziert. Vorhandene Daten sind oft nicht miteinander kompatibel, da diese mit unterschiedlichen Methoden und unter unterschiedlichen Gesichtspunkten/Fragestellungen erhoben wurden. Es fehlt somit eine übergeordnete Systematik im Hinblick auf die umfassende und belastbare Charakterisierung des Salzgrusversatzes. Dazu zählt beispielsweise das Salzgruskompaktionsverhalten bei verschiedenen Feuchtegehalten (trocken bis gesättigt) unter realen Gebirgsdruckbedingungen. Weiterhin fehlen Kennwerte und Parameter im Hinblick auf eine fortschreitende Kompaktion und Veränderung des Porenraums auch im Zusammenhang mit der zeitlichen Entwicklung der Auflockerungszone und der Kontaktzonen zwischen Steinsalzkontur und Dichtelementen. Die Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke ist für Salzgrus und Damm-Materialien weitgehend unbekannt, jedoch von großer Bedeutung für die hydraulische Entwicklung und den Stofftransport im Endlager. Für die Analyse des Gaspfades wird deshalb generell eine systematische Entwicklung von Zweiphasenflussparametern zum Salzgrusversatz empfohlen (s. Anhang A.9: AP 10 – 02 bis AP 10 – 05).

Grundsätzlich besteht F&E-Bedarf zur Weiterentwicklung fluiddynamischer Berechnungsmethoden zur Bewertung der Langzeitsicherheit, da die angewendeten Berechnungsmethoden nur Teilaspekte eines Endlagersystems abbilden. Mit den verfügbaren dreidimensionalen Berechnungsmethoden zum Zweiphasenfluss lassen sich nur sehr vereinfacht mögliche Radionuklidtransporte im Endlager berechnen, während detaillierte Berechnungsmethoden zum Radionuklidtransport den Zweiphasentransport vernachlässigen. Die Integration von Zweiphasenfluss und Radionuklidtransport und die Relevanz, die beide Phänomene für das Endlagersystem haben, macht eine Weiterentwicklung heutiger Berechnungsmethoden notwendig. Dabei ist die zeitliche Entwicklung des Endlagersystems schon in der Betriebsphase (modelltechnische Umsetzung der sukzessive Einlagerung) in die Berechnung mit einzubeziehen (s. Anhang A.9: AP 10 – 06).

F&E-Bedarf besteht weiterhin in Bezug auf die Beschreibung der Transportvorgänge gelöster Radionuklide (Diffusion, Advektion) in hochkompaktiertem Salzgrus und Sorbeton, der als Baustoff für Strecken- und Schachtverschlüsse verwendet wird. Bisher liegen nur Untersuchungen in höheren Porositätsbereichen vor. Die derzeitigen Diffusionsansätze gehen von freier Diffusion in den Poren aus. Die Tortuosität (Verlängerung der Diffusionswege) wird dabei nicht berücksichtigt. Die Mobilität von Fluiden bei sehr geringen Porositäten $< 2\%$ wird in Langzeitsicherheitsanalysen bisher weitgehend über das Darcy-Gesetz beschrieben. Die Frage, ob, die auf Korngrenzen haftenden Fluide noch über einen hydraulischen Gradienten transportiert werden können, oder wenn nicht, ob diese Fluide zur Diffusion von Schadstoffen zur Verfügung stehen, ist bisher nicht eindeutig geklärt. Die Entwicklung der Zustände im Endlager kann derzeit nur mit vereinfachten Prozessbetrachtungen analysiert werden. Aspekte wie der Transport von Wasserdampf und dessen Einfluss auf die Porositätsentwicklung aufgrund von Salzausfällung und -lösung können derzeit auf der Endlagerskala nicht betrachtet werden (s. Anhang A.9: AP 10 – 07 bis AP 10 – 08).

Weiterhin besteht F&E-Bedarf zur Weiterentwicklung der Beschreibung des Quellterms von Radionukliden aus den Abfällen, da die vorliegenden Kenntnisse nur Teilaspekte eines Endlagersystems berücksichtigen. In der vorliegenden radiologischen Konsequenzenanalyse wird die Freisetzung von volatilen Radionukliden aus den Abfällen in die Gasphase, insbesondere aus der IRF, modelltechnisch abdeckend berücksichtigt. Dies führt in den Analysen vor allem in der frühen Nachverschlussphase zu einer erhöhten Freisetzung des C-14 aus den Behältern und zu einer Überschätzung des aus dem Endlager strömenden Gases. Es besteht F&E-Bedarf hinsichtlich der Korrosion von Strukturteilen und der temperaturabhängigen Freisetzung von Radionukliden (Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen in der Gas- und Lösungsphase) bzw. der Wechselwirkungen mit Nebenbestandteilen (s. Anhang A.9: AP 10 – 09 bis AP 10 – 11).

Zur Bestimmung der Freisetzung der jeweiligen IRF für die Langzeitsicherheitsanalyse spielt die Prozesshistorie der Brennelemente von der Herstellung über die Einlagerung der Brennstäbe in POLLUX[®]-10-Behältern in der Betriebsphase bis zum Verschluss des Endlagers eine im Detail schwer quantifizierbare Rolle. Dies betrifft einerseits die in den Behältern initial vorhandenen Feuchtigkeitsmengen, die im Rahmen der Arbeiten zur VSG abgeschätzt werden, und andererseits die schon vor der Einlagerung in den Behältern ablaufenden Prozesse (u. a. Korrosionsprozesse), für die im Vorhaben VSG Modellannahmen getroffen werden. Weiterhin ist die Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung der Behälter, wenn diese ihre Integrität verlieren, weitgehend unbe-

kannt. Ein möglicher Gasspeicherraum, der durch die korrodierten Behälter entsteht, stellt einen möglichen sicherheitsrelevanten Aspekt dar, der derzeit modellmäßig nur abgeschätzt werden kann. Weiterhin sollte die Möglichkeit von zusätzlichen Gasspeicherräumen im Endlagerkonzept (z. B. auch in den Einlagerungsbereichen) geprüft werden. Solche Räume begrenzen die Gasdrücke im Endlager, senken den Druckgradienten aus dem Endlager heraus und stellen Speicherräume für die Verzögerung des Gas- und Schadstofftransports zur Verfügung. Entsprechendes gilt für die Behälterauslegung der Brennelement-Strukturteile, die auf Basis der Ergebnisse der volatilen Radionuklidfreisetzung hinsichtlich einer Gasdichtigkeit optimiert werden sollten (s. Anhang A.9: AP 10 – 12 und AP 10 – 13).

Der Anteil der zu betrachtenden Kohlenwasserstoffmengen in der Langzeitsicherheitsanalyse und ihre Auswirkungen auf das Korrosionsverhalten der Behälter und auf das geochemische Milieu bzw. die Feuchtemassen wurden im Vorhaben VSG abgeschätzt. Das Verhalten der Kohlenwasserstoffe bei Abfalleinlagerung bzw. Erhitzung bzw. ihr Migrationsverhalten bei Druckentlastung und die chemischen Prozesse unter Wärmeinfluss (z. B. thermochemische Sulfatreduktion) sind noch nicht hinreichend erforscht, u. a. fehlen limitierende Faktoren für den Ablauf der Reaktionsprozesse. Der notwendige F&E-Bedarf ist in /BRA 12/ bereits beschrieben.

Literaturverzeichnis

- /APC 05/ Appelo, C.A.J., Postma, D.: Geochemistry, groundwater and pollution. 2. Edition, 649 Seiten, ISBN 04-1536-428-0, A.A. Balkema Publishers: Rotterdam, 2005.
- /BAU 00/ Baudoin, P., Gay, D., Certes, C., Serres, C., Alonso, J., Lührmann, L., Martens, K.-H., Dodd, D., Marivout, J., Vieno, T.: Spent fuel disposal Performance Assessment (SPA Project). Final Report EUR 19132 EN, European Commission, Community Research, Nuclear Science and Technology, 2000.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübél, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BFS 01/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Dosiskoeffizienten bei innerer Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung. Koeffizienten für die Altersgruppe Erwachsener (>17a), C-14: Teil II, 1. Teil, Titel und Tabellen H3 bis Rh105 s. 166 (C-14); J-129: Teil II, 2. Teil, Tabellen Rh106m bis I135, s.780, Beilage 160 a und b zum Bundesanzeiger vom 28. August 2001, erreichbar unter <http://www.bfs.de/bfs/recht/dosis.html>: Berlin, 2001.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger AT 05.09.2012 B1: Bonn, 2012.

- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BRA 05/ Bracke, G., Müller, W.: Realistische und maximale Gasbildung in der Schachtanlage Asse. ISTec-A-979, ISTec: Köln, 2005.
- /BRA 12/ Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe "Kohlenwasserstoffe", Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, ISBN: 978-3-939355-61-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BRÄ 11/ Bräuer, V., Eickemeyer, R., Eisenburger, D., Grissemann, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönneke, J., Weber, J.R.: Description of the Gorleben site Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. ISBN 978-3-9814108-0-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.

- /BUH 91/ Buhmann, D., Nies, A., Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF-Bericht 27/91, 216 Seiten, Institut für Tiefenlagerung: Braunschweig, 1991.
- /BUH 09/ Buhmann, D., Grupa, J., Hart, J., Hirsekorn, R.-P., Ionescu, A., Lerch, C., Rübél, A., Schneider, A., Schröder, T.J.: Report on the benchmarks on rock salt. PAMINA - Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case, Deliverable D4.1.1, European Commission, 31.08.2009.
- /CAD 96/ Cadelli, N., Escalier des Orres, P., Marivoet, J., Martens, K.-H., Prij, J.: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final Storage of radioactive waste: Everest project. Summary Report EUR 17122 EN, 296 Seiten, European Commision, 1996.
- /CIN 00/ Cinar, Y.: Experimental investigation on the pore structure and fluid flow in artificially compacted salt granulates. Dissertation, Technische Universität Clausthal: Clausthal, 2000.
- /COD 02/ CODE-BRIGHT: A 3-D program for thermo-hydro-mechanical analysis in geological media. User's Guide, Universidad Politécnicna de Cataluña (UPC), 2002.
- /CZA 12/ Czaikowski, O., Wieczorek, K.: Salzgruskompaktion – Kalibrierung der in CODE_BRIGHT verwendeten physikalischen Modellansätze zur numerischen Simulation. Memo im Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 15.06.2012 (Rev. 30.08.2012).
- /DEL 10/ Delta h: Spring 4.0 - Benutzerhandbuch. Delta h: Witten, 2010.
- /DÖR 12/ Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert W., Tholen M.: In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben DBE-TEC: Peine, August 2012.

- /ELL 04/ Ellinger, C.: Untersuchungen zum Permeationsverhalten von Salzlaugen in Steinsalz bei der Endlagerung wärmeentwickelnder nuklearer Abfälle. Dissertation D17, Fachbereich Maschinenbau, Technischen Universität Darmstadt: Darmstadt, 1.11.2004.
- /EU 12/ European Union's European Atomic Energy Community's (Euratom): Seventh Framework Programme; Fast / Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel (FIRST Nuclides). erreichbar unter: <http://www.firstnuclides.eu>, zitiert am 18.12.2012.
- /FRI 12/ Frieling, G., Bracke, G.: Modellaufbau und Randbedingungen für den zweiphasigen Radionuklidtransport (TOUGH2). Memo im Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 04.12.2012.
- /GOM 97/ Gomit, J.M., Hirsekorn, R.-P., Martens, K.-H., Prij, J.: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: EVEREST project. Vol. 3b, Final report EUR 17449/3b EN, European Commission: Luxemburg, 1997.
- /GRP 98/ Grathwohl, P.: Diffusion in Natural Porous Media: Contaminant Transport, Sorption/Desorption and Dissolution Kinetics. Topics in Environmental Fluid Mechanics, Editoren: Chatwin, P., Dagan, G., List, J., Mei, C., Savage, S., ISBN 978-0-7923-8102-0, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- /GSF 02/ Pröhl, G., Gering, F.: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu §47 Strahlenschutzverordnung. GSF-Forschungszentrum Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz: Neuherberg, 2002.
- /HAR 03/ Harrington, J.F., Horseman, S.T.: Gas migration in KBS-3 buffer bentonite. Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. SKB TR-03-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), January 2003.

- /HUN 03/ Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke, I.: Projekt Gorleben – Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Abschlussbericht. Arbeitspaket 9G 213 811, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2003.
- /JAV 01/ Javeri, V.: Dreidimensionale Analysen zum Nuklidtransport bei salzanteilabhängiger Adsorption in einem porösen Medium mit dem Rechenprogramm TOUGH2. GRS-A-2864, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2001.
- /JAV 02/ Javeri, V.: Analysen zum Nuklidtransport bei variabler Salinität und nichtlinearer Adsorption in der stark heterogenen Geosphäre der Gorlebener Rinne. GRS-A-3038, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2002.
- /JAV 03/ Javeri, V.: Dreidimensionale Analysen zum Transport verschiedener Nuklidketten bei nichtlinearer Adsorption in einem porösen Medium mit dem Rechenprogramm TOUGH2. BMU-2003-624, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Köln, 2003.
- /JAV 04/ Javeri, V.: Dreidimensionale Analysen zum gekoppelten Gas-, Wärme- und Nuklidtransport in einem Endlager im Steinsalz. GRS-A-3191, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2004.
- /JAV 06a/ Javeri, V.: Three dimensional analyses of combined gas and nuclide transport in a repository considering coupled hydro-mechanical processes. In: Proc. TOUGH symposium 2006, Report LBNL-60087: USA, 2006.
- /JAV 06b/ Javeri, V.: Three dimensional analyses of coupled gas, heat and nuclide transport in a repository including rock salt convergence. In: Proc. TOUGH symposium 2006, Report LBNL-60087: USA, 2006.
- /JOH 02/ Johnson, L.H., McGinne, D.f.: Partitioning of Radionuclides in Swiss Power Reactor Fuels. 27 Seiten, Technical Report NTB 02-07, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen / Schweiz, August 2002.

- /JOH 04/ Johnson, L., Poinssot, C., Ferry, C., Lovera, P.: Estimation of the Instant Release Fraction for UO₂ and MOX fuel at t = 0. A Report of the Spent Fuel Stability (SFS) Project of the 5th Euratom Framework Program, Technical Report 04-08, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, November 2004.
- /JOL 97/ Johanson, L.H., Tait, J.C.: Release of segregated nuclides from spent fuel. 20 Seiten, SKB TR-97-18, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Stockholm, October 1997.
- /KIE 12/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: 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 für den Standort Gorleben, KIT-SR 7624, ISBN 978-3-86644-907-7, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE): Karlsruhe, 2012.
- /KIE 13/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: Source Term for Irradiated Fuel from Prototype, Research and Education Reactors, for Waste Forms with Negligible Heat Producing Waste Forms and for Uranium Tails. Als Bericht KIT-INE 001/12 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, KIT SR-7635, ISBN: 978-3-86644-964-0, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE): Karlsruhe, 2013.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 71, 147 Seiten, ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.

- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN: 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /KOC 13/ Kock, I.: Qualifizierung der in VSG verwendete Rechenprogramme und Codes. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: Köln, 2013.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, ISBN 978-3-510-95963-1, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM - Phase 1. Abschlussbericht, GRS-254, ISBN 978-3-939355-29-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, September 2009.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /LER 11a/ Lerch, C.: Thermische Behälterleistung in den Varianten B1 und C und Überprüfung der Einlagerung in der Variante B1. Memo zu Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 12.12.2011.
- /LER 11b/ Lerch, C.: Zeitliche Belegung der Einlagerungsfelder in der Variante B1 - Ausstieg 2022. Memo zu Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH, 30.11.2011.

- /MAG 06/ Magill, J., Pfennig, G., Galy, J.: Karlsruher Nuklidkarte. Report EUR 22276 EN, ISBN 92-79-02175-3, European Commission Joint Research Centre (EC-JRC), Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), 2006, revised printing 2011.
- /MAR 02/ Martens, K.-H., Fischer, H., Romstedt, P.: Beschreibung des Rechenprogrammes MARNIE. 135 Seiten, GRS-A-3027, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juni 2002.
- /MÖH 11/ Mönig, H.: Literaturstudie zur Metallkorrosion im Rahmen der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2011.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, ISBN: 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, ISBN 978-3-939355-51-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J.W.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-288, ISBN: 978-3-939355-64-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MÜL 12b/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /MÜL 12c/ Müller-Hoeppe, N.: Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichteelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 26.01.2012.
- /NAV 13/ Navarro, M.: Erweiterungen des Codes TOUGH2 zur Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Endlagern, In Vorbereitung. In Vorbereitung als Bericht zum Vorhaben 3609R03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /OLD 95/ Oldenburg, C.M., Pruess, K.: EOS7R: Radionuclide Transport for TOUGH2. LBL-34868, Lawrence Berkeley Laboratory: Berkeley, California, 1995.
- /PEI 11a/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2011.
- /PEI 11b/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-274, ISBN 978-3-939355-50-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /POP 06/ Poppei, J., Resele, G., Mayer, G., Hubschwerlen, N.: Lösungs- und Gasbewegung beim Einlagerungsbereich MAW in der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase. Modellrechnungen mit dem Programm TOUGH2. Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF), Colenco, 2006.

- /POP 12/ Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D.: Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Leipzig, 30.05.2012.
- /PRU 99/ Pruess, K.O., C.; Moridis, G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. LBNL-43134, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California: Berkeley, California, USA, 1999.
- /RÜB 10/ Rübel, A., Mönig, J.: Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz. 142 Seiten, GRS-A-3521, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2010.
- /SAN 99/ Sander, R.: Henry's Law Constants. National Institute of Standards and Technology, erreichbar unter: <http://webbook.nist.gov>, zitiert am 27.09.2012.
- /SEH 13/ Seher, H.: Zusammenstellung der Inventare zur Modellierung. Memo im Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2013.
- /SEN 08/ Senger, R., Marschall, P., Finsterle, S.: Investigation of two-phase flow phenomena associated with corrosion in an SF/HLW repository in Opalinus Clay, Switzerland. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Vol. 33, No. Supplement 1, S. S317-S326, DOI 10.1016/j.pce.2008.10.034, 2008.
- /SKR 05/ Skrzyppek, J., Mayer, G., Wilhelm, St., Niemeyer, M., Folle, St., Rolfs, O., Suter, D.: Untersuchung der Gasbildungsmechanismen in einem Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Endlagersicherheit. Abschlussbericht, Colenco Bericht 3161/28: Baden, Mai 2005.

- /SMA 96/ Smailos, E.: In-Situ Corrosion Testing of Selected HLW Container Materials. S. 462-463, The 7th Annual International Conference on High-Level Radioactive Waste Management (IHLRWM): Las Vegas, Nevada, 1996.
- /SMI 93/ Smith, H.D., Baldwin, D.L.: An investigation of thermal release of carbon-14 from PWR Zircaloy spent fuel cladding. Journal of Nuclear Materials, Vol. 200, No. 1, S. 128-137, DOI 10.1016/0022-3115(93)90016-r, 1993.
- /VKO 85/ Van Konynenburg, R.A., Smith, C.F., Culham, H.W., Otto, C.H., Jr. : Behavior of Carbon-14 in Waste Packages for Spent Fuel in a Repository in Tuff. MRS Proceedings, Vol. 44, DOI 10.1557/PROC-44-405, 1984.
- /WEB 11/ Weber, J.R., Hammer, J., Schulze, O.: 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): Hannover, 2011.
- /WIE 12/ Wiczorek, K., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Czaikowski, O., Navarro, M.: Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus. Technischer Bericht, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, August 2012.
- /WOL 12/ 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., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /WVO 95/ Verordnung über einen Energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden, Wärmeschutzverordnung (WärmeschutzVO), in der Fassung vom 16. August 1994 (BGBl. I 1994 S. 2121).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schema der Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Storyboards	15
Abb. 3.1	Teilansicht des Ostflügels der Einlagerungsvariante AB1 nach /BOL 12/	27
Abb. 3.2	Teilansicht des Westflügels in der Einlagerungsvariante AB1 /BOL 12/ ...	27
Abb. 3.3	Verteilung einiger Spalt- und Aktivierungsprodukte in einem Brennstab /JOH 02/	30
Abb. 3.4	Radionuklide der IRF in der Oxidschicht des Hüllrohres (verändert nach /JOH 02/)	31
Abb. 3.5	Funktionselemente des Schachtverschlusses Gorleben (aus /MÜL 12b/).....	35
Abb. 3.6	Lage einiger Temperaturstützstellen in den Richtstrecken im Grubenbau der Einlagerungsvariante AB1 (nach /BOL 12/).....	38
Abb. 3.7	Temperaturverlauf an einigen ausgewählten Stützstellen (Abb. 3.6) nach der Temperaturfeldberechnung von /LER 11a/.....	39
Abb. 3.8	Berechnung der Salzgruskompaktion mit Code_Bright in den Kriechklassen (KKI) 3 und 5 (nach /CZA 12/).....	42
Abb. 3.9	Alle für Trendaussagen im Bereich $\Phi < 10\%$ geeignet erscheinenden hydraulischen Messdaten (nach /KRÖ 09/).....	44
Abb. 3.10	Extrapolation der Bandbreite der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung (nach /KRÖ 09/).....	44
Abb. 3.11	Gas- und Laugenpermeabilität von Salzgrus (Poro-Perm-Beziehung nach /WIE 12/).....	45
Abb. 3.12	Vergleich von relativer Diffusionskonstante D' zur Porosität /GRP 98/	49
Abb. 4.1	Darstellung des Ostflügels mit dem Infrastrukturbereich auf der 870 m-Sohle im MARNIE-Grubenmodell	65

Abb. 4.2	Darstellung des Westflügels mit dem Infrastrukturbereich auf der 870 m-Sohle im MARNIE-Grubenmodell	66
Abb. 4.3	Modellgitter des Grubenbaus für die Einlagerungsvarianten AB1 und B1 im TOUGH2-Grubenmodell	67
Abb. 4.4	Vergleich der Porositätsentwicklung	75
Abb. 4.5	Einteilung der Strecken im Endlager auf Basis der Temperaturfeldrechnungen /LER 11a/ und dem Feuchtegrad des Salzgrusversatzes zur Approximation der Salzgrusversatzkompaktion....	76
Abb. 4.6	Schematische Darstellung der Berechnung der Abklingzeit zur Bestimmung des Radionuklidinventars zum Zeitpunkt der Einlagerung am Beispiel einer CSD-C Kokille.....	88
Abb. 4.7	In den Rechnungen mit MARNIE verwendete Nuklide der Zerfallsreihen. Halbwertszeiten der einzelnen Nuklide s. Tab. 4.11	99
Abb. 4.8	Parametervariation des Freisetzungsorts für einen POLLUX [®] -10 Behälter	115
Abb. 5.1	Entwicklung der Porosität des Salzgrusversatzes in einzelnen Strecken in Abhängigkeit von Feuchtegrad und Wärmeeintrag bei schneller Kompaktion	127
Abb. 5.2	Lösungssättigung der Strecken im Rechenfall R1 zum Referenzszenarium nach $1 \cdot 10^6$ Jahren	129
Abb. 5.3	Entwicklung der Porosität des Salzgrusversatzes im Rechenfall PV-R1 in einzelnen Strecken in Abhängigkeit vom Feuchtegrad und Wärmeeintrag bei langsamer Kompaktion	130
Abb. 5.4	Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Rechenfall PV-R3.....	132
Abb. 5.5	Aktivitätsströme der für die Berechnung des RGI relevanten Radionuklide am Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) im Rechenfall PV-R3.....	133
Abb. 5.6	Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Rechenfall PV-R6.....	136

Abb. 5.7	Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Alternativszenarium <i>Schachtverschlussversagen</i>	138
Abb. 5.8	Aktivitätsströme der für die Berechnung des RGI relevanten Radionuklide am Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) im Rechenfall PV-A4	141
Abb. 5.9	Lösungssättigung der Strecken nach $1 \cdot 10^6$ Jahren im Rechenfall WI-A2	146
Abb. 5.10	Aktivitätsströme der Radionuklide Ni-59 und Zr-93 über den Streckenverschluss Ost zur Richtstrecke Süd im Ostflügel (Abb. 4.1) in den Rechenfällen PV-R3, PV-A4 und WI-A5.....	149
Abb. 5.11	C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 1.....	154
Abb. 5.12	C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 2.....	156
Abb. 5.13	C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 3.....	158
Abb. 5.14	I-129 Freisetzung in den Infrastrukturbereich.....	159
Abb. 5.15	C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 5.....	161
Abb. 5.16	C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 6.....	162
Abb. 5.17	C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich Teil 7.....	163
Abb. 6.1	RGI am Streckenverschluss Ost des Ostflügels (Abb. 4.1) als Ergebnis der durchgeführten Radionuklidtransportrechnungen: Parametervariationen des Referenz- und des Alternativszenariums <i>Schachtverschlussversagen</i>	168
Abb. A.1	Endlagerkonzept in der Einlagerungsvariante AB1 der DBE TECHNOLOGY mit Beschriftungen für die Bestimmung von Abständen (nach /BOL 12/)	205
Abb. A.2	MARNIE-Grubenmodell nach dem Einlagerungskonzept AB1 /BOL 12/	209
Abb. A.3	C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich	243
Abb. A.4	C-14 Freisetzung über die Streckenverschlüsse Ost und Mitte	244

Abb. A.5	Gasfluss über den nördlichen Streckenverschluss.....	245
Abb. A.6	C-14 Freisetzung über verschiedene Streckenverschlüsse.....	246
Abb. A.7	Berechneter RGI auf Basis der Aktivitätsströme durch die unter- sten Dichtelemente der Schachtverschlüsse (Summe aus Schacht 1 und 2)	247

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Initial-FEP für die Einlagerungsvariante AB1 (nach /BEU 12/)	17
Tab. 2.2	Weniger wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere	20
Tab. 2.3	Übersicht aller Alternativszenarien für die Einlagerungsvarianten AB1 aus /BEU 12/	21
Tab. 2.4	Alternativszenarien zur Integritätsprüfung /BEU 12/.....	23
Tab. 3.1	„Instant Release Fraction“ (IRF) - Anteil in %, bezogen auf das Inventar des jeweiligen Radionuklids in der UO ₂ -Matrix (IRF _{Matrix}), im Hüllrohr (IRF _{Hülle}), in den Strukturteilen (IRF _{Struktur}) und den sonstigen radioaktiven Mischabfälle (IRF _{Sonstige}).....	33
Tab. 3.2	Auslegungsgrößen der Funktionselemente nach /MÜL 12b/.....	36
Tab. 3.3	Parametrisierung der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung	46
Tab. 3.4	Initiale Lösungsmengen pro Behälter, für den Ost- und Westflügel.....	53
Tab. 3.5	Außenkorrosion <i>„trockenes Szenario“</i> aus /MÖH 11/.....	55
Tab. 3.6	Außenkorrosion <i>„feuchtes Szenario“</i> aus /MÖH 11/.....	55
Tab. 4.1	Hydraulische Modellparameter für verschiedene Bereiche des Endlagers	69
Tab. 4.2	Hydraulische Parameter der Schachtfunktionselemente in den Modellen von MARNIE und TOUGH2 auf Basis der Auslegungswerte /MÜL 12a/ in Tab. 3.2	70
Tab. 4.3	Zeitpunkte des Erreichens von 5 % Porosität für die unterschiedlichen Kategorien aus Abb. 4.5	74
Tab. 4.4	Zeitliche Belegung der Einlagerungsfelder in der Variante B1 – Ausstieg im Jahr 2022 /LER 11b/.....	78
Tab. 4.5	Geochemische Randbedingungen für wärmeproduzierende Abfälle in NaCl bzw. MgCl ₂ dominierten Systemen.....	90

Tab. 4.6	Geochemische Randbedingungen für die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in NaCl-, MgCl ₂ bzw. CaCl ₂ -dominierten Systemen	90
Tab. 4.7	IRF _{Matrix} der Brennstäbe der NS Otto Hahn /KIE 13/.....	91
Tab. 4.8	MARNIE-Eingabewerte zur Glaskorrosion	93
Tab. 4.9	Freisetzungsdauer als MARNIE-Eingabewerte für die Teilbereiche IRF _{Stab} , Brennstoffmatrix und Hüllrohr eines Brennstabes.....	95
Tab. 4.10	Berechnungsgrundlagen für das Inventar eines Behälters aus dem Gesamtinventar der sonstigen radioaktiven Mischabfälle.....	96
Tab. 4.11	Bei der Zusammenstellung für die MARNIE-Rechnungen verwendete Radionuklide und deren Halbwertszeiten nach /MAG 06/	98
Tab. 4.12	Löslichkeitsgrenzen C _{i0} [kg·(kg H ₂ O) ⁻¹] in MARNIE auf Basis der Daten aus /KIE 12/ für eine Mg-gesättigte Lösung bei pH 9	100
Tab. 4.13	Rechenfälle und wichtige Parameter der MARNIE Berechnungen zum Referenzszenarium.....	102
Tab. 4.14	Rechenfälle und wichtige Parameter der MARNIE Berechnungen zum Alternativszenarium <i>Schachtverschlussversagen</i>	104
Tab. 4.15	Rechenfälle und wichtige variierte Parameter der MARNIE Berechnungen zum Alternativszenarium <i>Streckenverschlussversagen</i> (Einlagerungsvariante AB1).....	105
Tab. 4.16	What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Referenzszenariums (Einlagerungsvariante B1)	106
Tab. 4.17	What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Alternativszenariums <i>Schachtverschlussversagen</i>	107
Tab. 4.18	Verwendete Radionuklidmassen für TOUGH2 Rechnungen.....	110
Tab. 4.19	Parameter für den Radionuklidtransport in der Gas- und Flüssigphase.....	112
Tab. 4.20	Rechenfälle des Referenzszenariums für C-14 (Endlagerkonzept B1, 1 % Restporosität), Parametervariationen Teil 1	117

Tab. 4.21	Rechenfälle des Referenzszenariums für C-14 (Endlagerkonzept B1, 1 % Restporosität), Parametervariationen Teil 2.....	118
Tab. 4.22	Rechenfälle des Referenzszenariums für C-14, Parametervariationen Teil 3.....	119
Tab. 4.23	Rechenfälle des Referenzszenariums für I-129, Parametervariationen Teil 4.....	119
Tab. 4.24	Rechenfälle der Alternativszenarien für C-14, Parametervariationen Teil 1.....	121
Tab. 4.25	Rechenfälle der Alternativszenarien für C-14, Parametervariationen Teil 2.....	122
Tab. 4.26	Rechenfälle der Alternativszenarien für C-14, Parametervariationen Teil 3.....	123
Tab. 5.1	What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Referenzszenariums (Einlagerungsvariante B1)	143
Tab. 5.2	What-if-Rechenfälle zum Systemverständnis auf Basis des Alternativszenariums <i>Schachtverschlussversagen</i>	144
Tab. 5.3	Überblick über die betrachteten TOUGH2-Rechenfälle.....	152
Tab. A.1	Richtstrecke Süd im Ostflügel: Einzelstrecken zwischen den Einlagerungsfeldern.....	206
Tab. A.2	Richtstrecke Nord im Ostflügel: Einzelstrecken zwischen den Einlagerungsfeldern und Verbindung Infrastrukturbereich	206
Tab. A.3	Abstände der Querschläge im Ostflügel.....	207
Tab. A.4	Abstände der letzten Einlagerungsstrecken zur Richtstrecke Süd in den Querschlägen des Ostflügels	207
Tab. A.5	Modellierte Längen der Abstände von der Richtstrecke Nord zur ersten Einlagerungsstrecke	208
Tab. A.6	Längen der Teilstrecken im Westflügel	208

Tab. A.7	Streckenlängen der Einlagerungsstrecken im Ost- und Westflügel des MARNIE-Grubenmodells	210
Tab. A.8	Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen.....	213
Tab. A.9	Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht.....	219
Tab. A.10	Faktor <i>floc</i> zum Erreichen der in Tab. 4.3 gegebenen Zeitpunkte mit der Referenzkonvergenzrate $0,01 \text{ a}^{-1}$	229
Tab. A.11	Weitere Parameter des Kompaktionsansatzes	229
Tab. A.12	Anzahl der Kokillen und der Brennelemente bezogen auf die Altersklasse bzw. die Inbetriebnahme des Endlagers im Jahr 2035 sowie die korrespondierende Schwermetallmasse der Brennelemente /PEI 11a/.....	230
Tab. A.13	Streckengenaue Aufstellung der Belegung der Einlagerungsstrecken nach Behältertyp und Abfallart im MARNIE-Modell (Einlagerungsvariante AB1)	231
Tab. A.14	Anteile in der IRF_{Stab} , der Brennstoffmatrix und dem Hüllrohr an dem Inventar eines Brennstabes für die verwendeten Nuklide.....	235
Tab. A.15	Inventare der einzelnen Abfallarten zu Beginn der Nachverschlussphase aus einer MARNIE Rechnung (Zeitpunkt 40,6 Jahre nach Beginn der Einlagerung im Jahre 2035) /SEH 13/	237
Tab. A.16	Parameter für die Berechnung der Korrosion und der resultierenden Gasbildung für die verschiedenen Endlagerbehälter	240
Tab. A.17	Dosiskonversionsfaktoren (DKF) für die berücksichtigten Nuklide in $\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1} / \text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ /GSF 02/	241

A Anhang

A.1 Abmessungen des Grubengebäudes

Die Abmessungen des Endlagers nach dem Endlagerkonzept der DBE TECHNOLOGY aus Arbeitspaket 5 /BOL 11/ mit der Optimierung aus Arbeitspaket 6 /BOL 12/ sind anhand der Abstände einzelner, in Abb. A.1 bezeichneter, Punkte angegeben.

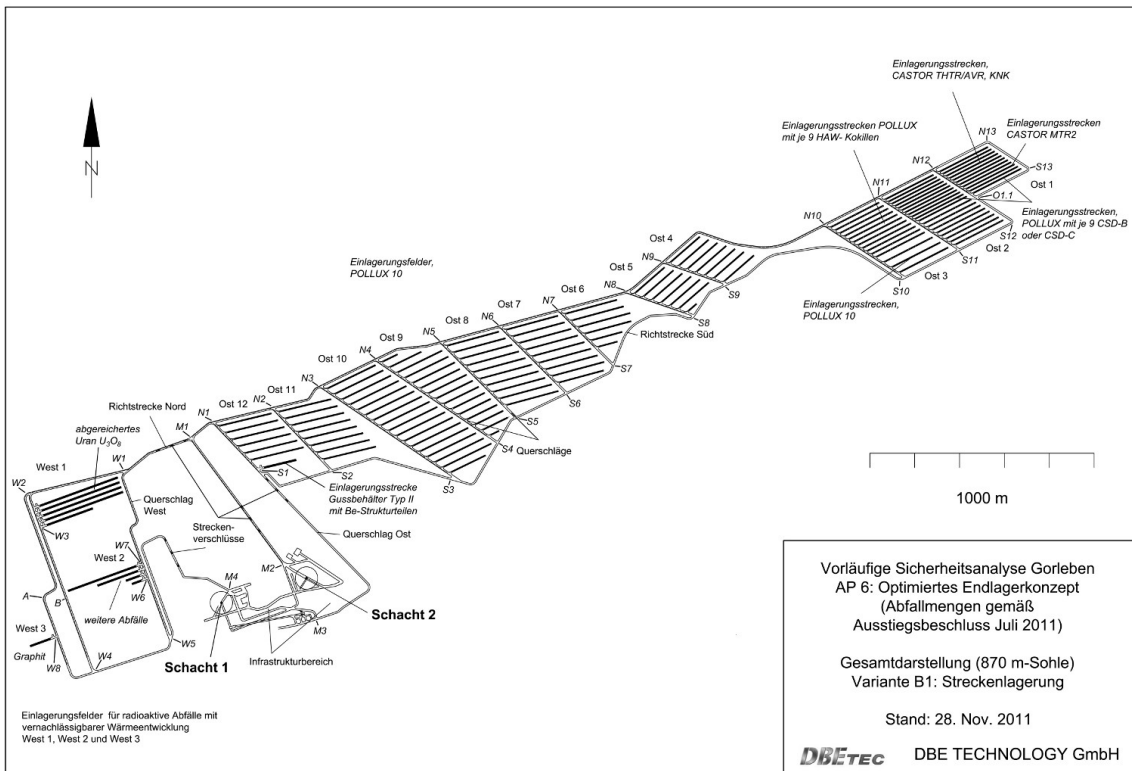


Abb. A.1 Endlagerkonzept in der Einlagerungsvariante AB1 der DBE TECHNOLOGY mit Beschriftungen für die Bestimmung von Abständen (nach /BOL 12/)

Tab. A.1 Richtstrecke Süd im Ostflügel: Einzelstrecken zwischen den Einlagerungsfeldern

Einlagerungsfeld	Von	Bis	Länge [m]
	Verschluss Querschlag Ost	S1	35
Ost 12	S1	S2	348
Ost 11	S2	S3	599
Ost 10	S3	S4	269
Ost 9	S4	S5	141
Ost 8	S5	S6	250
Ost 7	S6	S7	250
Ost 6	S7	S8	489
Ost 5	S8	S9	210
Ost 4	S9	S10	873
Ost 3	S10	S11	273,17
Ost 2	S11	S12	272,5
Ost 1	S12	S13	272,5

Tab. A.2 Richtstrecke Nord im Ostflügel: Einzelstrecken zwischen den Einlagerungsfeldern und Verbindung Infrastrukturbereich

Einlagerungsfeld	Von	Bis	Länge [m]
	M1	N1	115
Ost 12	N1	N2	286
Ost 11	N2	N3	244
Ost 10	N3	N4	273
Ost 9	N4	N5	305
Ost 8	N5	N6	273
Ost 7	N6	N7	273
Ost 6	N7	N8	310
Ost 5	N8	N9	214
Ost 4	N9	N10	798
Ost 3	N10	N11	272,5
Ost 2	N11	N12	272,5
Ost 1	N12	N13	272,5

Tab. A.3 Abstände der Querschläge im Ostflügel

Einlagerungs- feld	Von	Bis	Länge [m]
Ost 12	N1	S1	305
Ost 11	N2	S2	375
Ost 10	N3	S3	741
Ost 9	N4	S4	651
Ost 8	N5	S5	470
Ost 7	N6	S6	418
Ost 6	N7	S7	335
Ost 5	N8	S8	312
Ost 4	N9	S9	292
Ost 3	N10	S10	420
Ost 2	N11	S11	420
Ost 1	N12	O1.1	221
	O1.1	S12	199
	N13	S13	221

Tab. A.4 Abstände der letzten Einlagerungsstrecken zur Richtstrecke Süd in den Querschlägen des Ostflügels

Einlagerungs- feld	Von	Länge Projektion senkrecht [m]	Länge model- liert [m]
Ost 1	Süd	19	21,15
Ost 2	Süd	19	26,15
Ost 3	Süd	19	29,85
Ost 4	Süd	14	19,85
Ost 5	Süd	31	39,85
Ost 6	Süd	104	104,35
Ost 7	Süd	57	62,85
Ost 8	Süd	69	73,35
Ost 9	Süd	46	46,86
Ost 10	Süd	52	53,86
Ost 11	Süd	60	61,35
Ost 12	Süd	20,05	23,15

Tab. A.5 Modellierte Längen der Abstände von der Richtstrecke Nord zur ersten Einlagerungsstrecke

Einlagerungs- feld	Von	Länge Projektion senkrecht [m]	Länge modelliert [m]
Ost 1	Nord	20,05	23,15
Ost 2	Nord	20,05	23,15
Ost 3	Nord	20,05	23,15
Ost 4	Nord	20,05	23,15
Ost 5	Nord	20,05	23,15
Ost 6	Nord	20,05	23,15
Ost 7	Nord	20,05	23,15
Ost 8	Nord	20,05	23,15
Ost 9	Nord	20,05	23,15
Ost 10	Nord	20,05	23,15
Ost 11	Nord	20,05	23,15
Ost 12	Nord	20,05	23,15

Tab. A.6 Längen der Teilstrecken im Westflügel

Einlagerungsfeld	Von	Bis	Länge [m]
West 2	W1	W5	813
Richtstrecke	W1	W2	451
West 1	W2	W3	162
West 1	W3	W4	798
West 1	W2 B	W4	846
West 3	W2	W8	709
West	W2 A	W4	998
West 3	W8	W4	290
Richtstrecke	W4	W5	411
West 2	W5	W6	293,6
West 2	W6	W7	68,4
West 2	W7	W1	451

A.2 Anhang zu Kap. 4.2.1 – Umsetzung des Grubenbaus

A.2.1 Weitere Parameter zum Grubenbau für das Programm MARNIE

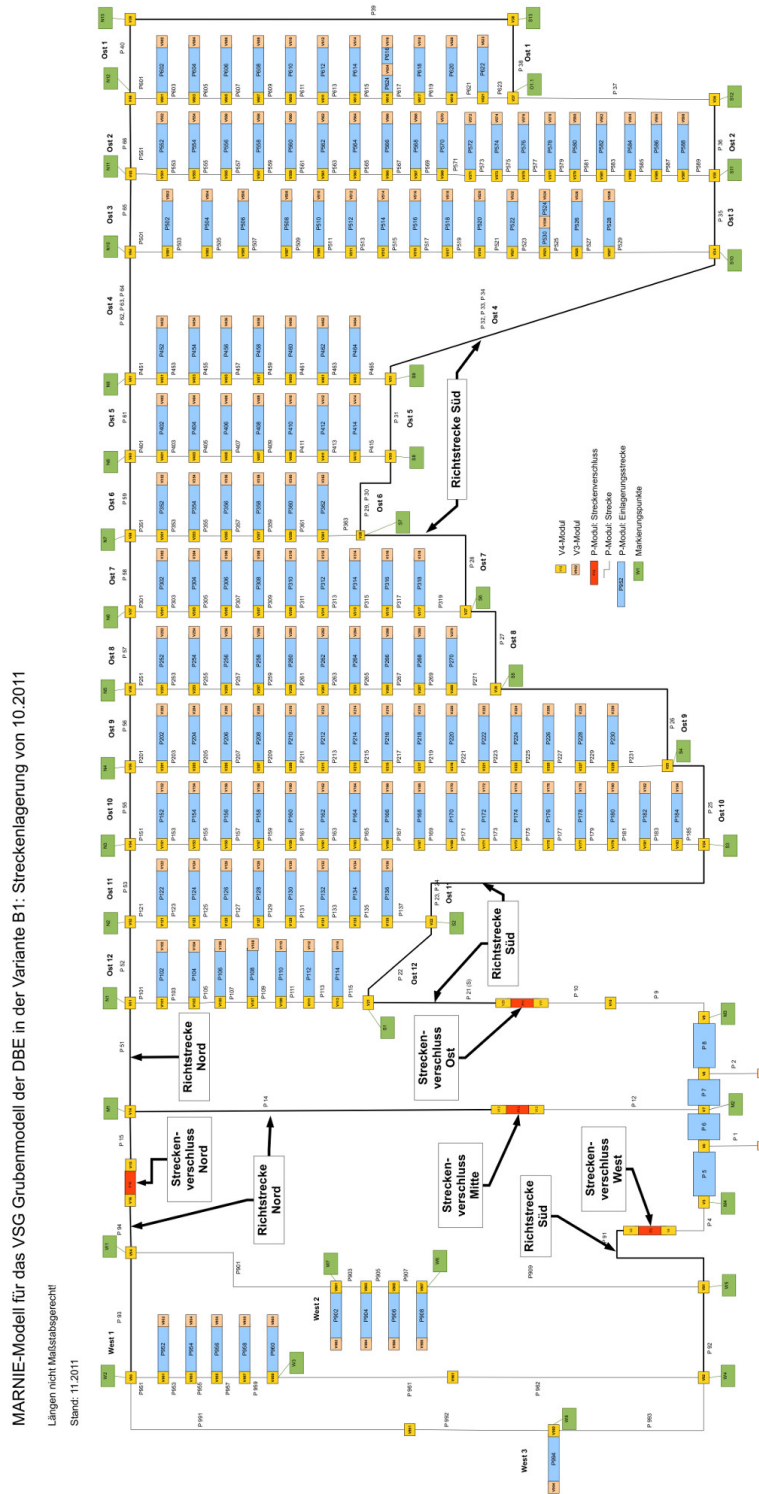


Abb. A.2 MARNIE-Grubenmodell nach dem Einlagerungskonzept AB1 /BOL 12/

Tab. A.7 Streckenlängen der Einlagerungsstrecken im Ost- und Westflügel des MARNIE-Grubenmodells

EL Feld-Nr.	P-Module	Behältertyp	Anzahl Strecken	Behälteranzahl pro Strecke	Behälterabstand [m]	Streckenlänge [m]
Ost 1						
Ost 1.1 bis 1.7	602 – 614	CASTOR®-THTR	8	61	1	245
Ost 1.8a	616	CASTOR®-THTR	1	30	1	245
Ost 1.8b	616	CASTOR®-MTR2		30		
Ost 1.8c	616	CASTOR®-MTR2		12		
Ost 1.8d	624	CASTOR®-KNK		4		
Ost 1.9a	618	CASTOR®-MTR2	1	8	1	245
Ost 1.9b	618	POLLUX®-CSD		32		
Ost 1.10 bis 1.11	620 – 622	POLLUX®-CSD	2	35	1	245
Ost 2						
Ost 2.1 bis 2.11	552 – 572	POLLUX®-CSD	11	35	1	245
Ost 2.12a	574	POLLUX®-CSD	1	4	1	245
Ost 2.12b	574	POLLUX®-9		18	5,5	
Ost 2.13 bis 2.19	576 – 588	POLLUX®-9	7	21	5,5	245
Ost 3						
Ost 3.1 bis 3.11	502	POLLUX®-9	11	21	5,5	245
Ost 3.12a	524	POLLUX®-9	1	19	5,5	245
Ost 3.12b	530	POLLUX®-10		2	2,63	
Ost 3.13 bis 3.14	526 – 528	POLLUX®-10	2	28	2,63	245
Ost 4						
Ost 4.1 bis 4.7	452 – 464	POLLUX®-10	7	20	2,63	180

EL Feld-Nr.	P-Module	Behältertyp	Anzahl Strecken	Behälteranzahl pro Strecke	Behälterabstand [m]	Streckenlänge [m]
Ost 5						
Ost 5.1a	402	POLLUX®-10	1	4	2,63	180
Ost 5.1b	402	POLLUX®-10		16		
Ost 5.2 bis 5.7	404 – 414	POLLUX®-10	6	20	2,63	180
Ost 6						
Ost 6.1 bis 6.3	352 – 356	POLLUX®-10	3	28	2,63	245
Ost 6.4	358	POLLUX®-10	1	25	2,63	219
Ost 6.5	360	POLLUX®-10	1	16	2,63	147
Ost 6.6	362	POLLUX®-10	1	10	2,63	95
Ost 7						
Ost 7.1 bis 7.8	302 – 316	POLLUX®-10	8	28	2,63	245
Ost 7.9	318	POLLUX®-10	1	24	2,63	212
Ost 8						
Ost 8.1 bis 8.10	252 – 270	POLLUX®-10	10	28	2,63	245
Ost 9						
Ost 9.1	202	POLLUX®-10	1	8	2,63	82
Ost 9.2	204	POLLUX®-10	1	18	2,63	162
Ost 9.3	206	POLLUX®-10	1	26	2,63	225
Ost 9.4	208	POLLUX®-10	1	25	2,63	219
Ost 9.5	210	POLLUX®-10	1	24	2,63	212
Ost 9.6	212	POLLUX®-10	1	22	2,63	199
Ost 9.7	214	POLLUX®-10	1	22	2,63	194
Ost 9.8	216	POLLUX®-10	1	21	2,63	186
Ost 9.9	218	POLLUX®-10	1	20	2,63	178
Ost 9.10	220	POLLUX®-10	1	19	2,63	170
Ost 9.11	222	POLLUX®-10	1	18	2,63	160
Ost 9.12	224	POLLUX®-10	1	17	2,63	154
Ost 9.13	226	POLLUX®-10	1	16	2,63	146
Ost 9.14	228	POLLUX®-10	1	14	2,63	129
Ost 9.15	230	POLLUX®-10	1	4	2,63	49

EL Feld-Nr.	P-Module	Behältertyp	Anzahl Strecken	Behälteranzahl pro Strecke	Behälterabstand [m]	Streckenlänge [m]
Ost 10						
Ost 10.1 bis 10.16	152 – 182	POLLUX®-10	16	28	2,63	245
Ost 10.17	184	POLLUX®-10	1	20	2,63	178
Ost 11						
Ost 11.1 bis 11.8	122 – 136	POLLUX®-10	8	28	2,63	245
Ost 12						
Ost 12.1 bis 12.6	102 – 112	POLLUX®-10	6	28	2,63	245
Ost 12.7	114	Gussbehälter Typ II	1	2620	0,1	172,6
West 1						
West 1.1 bis 1.4	952 – 958	Konrad Typ VI	4	1575	0,1	394,5
West 1.5	960	Konrad Typ VI	1	917	0,1	239
West 2						
West 2.1	902	Konrad Typ IV	1	1068	0,1	347,4
West 2.2	904	Konrad Typ IV	1	627	0,1	216
West 2.3	906	Gussbehälter Typ II	1	1150	0,1	91
West 2.4	908	Betonbehälter Typ I	1	800	0,19	69
West 3						
West 3.1	994	Gussbehälter Typ II	1	2300	0,1	124,2

A.2.2 Detaillierte Eingabeparameter für das Programm TOUGH2

Tab. A.8 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen

Parameter	Allgemeine Parameter und initiale Bedingungen für alle Materialien
Feststoffdichte	Die Dichte für alle Materialien spielt in den TOUGH2-Rechnungen keine Rolle, da kein Wärmetransport und keine Sorption betrachtet werden.
Initiale Temperatur	38,5 °C Das von Lerch /LER 11a/ modellierte Temperaturfeld des zukünftigen Endlagers wird zeitabhängig als Tabelle in TOUGH2 vorgegeben.
Initialer Druck	1·10⁵ Pa Der initiale Druck in allen Materialien ist gleich dem Atmosphärendruck, nur in der Randbedingung im Materialgebiet SCH10 ist der initiale Druck unterschiedlich.
Laugenanteil in der flüssigen Phase	0,99
Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Materials	0 Die thermische Expansion in allen Materialien wird vernachlässigt.
Klinkenberg-Parameter	0 Bei Gasströmung in Porenräumen, deren Durchmesser kleiner als die mittlere freie Weglänge ist, kann der Klinkenberg-Effekt vernachlässigt werden.
Tortuositätskoeffizient für die Diffusion	1 Wenn ein poröses Medium entsättigt, sinkt der Transportquerschnitt für die Diffusion gelöster Stoffe und die Tortuosität der Migrationswege erhöht sich. Damit sinkt die Stärke des diffusiven Transports. In TOUGH2 kann dieser Effekt über die Tortuosität berücksichtigt werden. Sättigungsabhängige Tortuositäten verursachen in TOUGH2 Probleme, wenn z. B. ein fast vollständig entsättigtes Gitterelement an ein gesättigtes angrenzt. Das im Restwasser des entsättigten Elementes gelöste Gas kann nicht weg diffundieren, da die Tortuosität sehr groß geworden ist. Dieses unphysikalische Ausbleiben des diffusiven Transports beruht darauf, dass TOUGH2 keine Gaslösung über Elementgrenzen hinweg betrachten kann. Ein solcher Prozess würde jedoch einen diffusiven Transport von gelöstem Gas unterstützen. Um dieses Problem zu umgehen, wird ein Tortuositätskoeffizient von 1 vorgegeben (geringe Tortuosität). Die Tortuosität ist somit nicht sättigungsabhängig.

Tab. A.8 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen (Fortsetzung)

Material	Abdichtungsbauwerke (Damm) aus Sorelbeton einschließlich Auflockerungszone
TOUGH2-Materialgebiet	DAMM
Porosität	0,2 In /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ wird ein Porositätsbereich zwischen 16,1 Vol.-% und 23,6 Vol.-% für unverdichteten Sorelbeton angegeben, wobei nicht zwischen effektiver und totaler Porosität unterschieden wurde. Für die VSG wird der Mittelwert gewählt.
Konvergenz	Das Material wird als nicht kompaktierbar angenommen.
Intrinsische Permeabilität	$5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$, zeitlich konstant Laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ besitzt der Verbund aus Bauwerk und Auflockerungszone eine mittlere integrale Permeabilität von $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$. Zu erwarten ist, dass die integrale Permeabilität aufgrund der Konvergenz der Auflockerungszone abnimmt. Sie wird hier jedoch in konservativer Weise überschätzt und als gleichbleibend angenommen.
Kapillardrücke und relative Permeabilitäten	Gaseindringdruck: 0,22 MPa Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf. Die Parametrisierung erfolgt hier mit dem Ziel, einen bestimmten Gaseindringdruck einzustellen. Der Gaseindringdruck wird relevant, wenn die Barriere aufgesättigt ist und Endlagergase ausströmen. Zu diesem Zeitpunkt ist die EDZ voraussichtlich geschlossen (Selbstheilung). Es kann daher der Gaseindringdruck des Sorelbetons verwendet werden. Sorelbeton (ohne EDZ) zeigt laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ einen Gaseindringdruck zwischen 0,18 MPa – 0,26 MPa. Für die VSG wird der Mittelwert verwendet, da die Konservativität einer Über- oder Unterschätzung nicht bekannt ist. Der Gaseindringdruck wird über die Wahl der Kapillardruckkurve eingestellt. Kapillardruckkurve: <ul style="list-style-type: none"> • Van-Genuchten-Kurve mit $n = 1,5$ (d. h. $\lambda = 0,333$), $P_0 = 0,22 \text{ MPa}$, $S_{\text{liq, res, pcap}} = S_{\text{gas, res, pcap}} = 0$. Einführung einer oberen Kapillardruckgrenze aus numerischen Gründen: $p_{\text{cap, cut-off}} = 1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$. • Wahl von n für Sorelbeton gemäß /POP 06/. Relative Permeabilitäten: <ul style="list-style-type: none"> • Corey-Kurve • mit $S_{\text{liq, res, krel}} = 0.80$ und $S_{\text{gas, res, krel}} = 0$ Bei $S_{\text{liq, res, krel}}$ handelt es sich um eine Flüssigkeitssättigung, bei $S_{\text{gas, res, krel}}$ um eine Gassättigung. Die residuale Flüssigkeitssättigung $S_{\text{liq, res, krel}}$ wurde aus numerischen Gründen so eingestellt, dass die Initial enthaltene Wassermenge von 80 % immobil ist.
Initiale Flüssigkeitssättigung	0.8 Laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/

Tab. A.8 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen (Fortsetzung)

Material	Widerlager und Pflöfen mit Auflockerungszone
TOUGH2- Materialgebiete	WDL, PFR
Datenlage	An die Widerlager und Pflöfen werden keine hydraulischen Anforderungen gestellt.
Analogie	Alle Daten wie für Dämme bis auf die Permeabilität
Intrinsische Permeabilität	$1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ Da die Auflockerungszone im Bereich der Widerlager und Pflöfen nicht nachgeschnitten wird, ist die integrale Permeabilität höher. Zudem werden keine Anforderungen an die Dichtwirkung gestellt, da die Widerlager nur zum Zweck des mechanischen Einspannens des Damms erstellt werden und die Pflöfen einen direkten Kontakt zwischen dem Salzgrus der Richtstrecken und der Querschläge verhindern.
Material	Trockener und feuchter Salzgrusversatz (mit MgCl_2 befeuchtet)
TOUGH2- Materialgebiete	RICHO, RICHW, QUERW, QUER
Porosität	0.35 (initial) Quelle: /BOL 11/ Gleich für trockenen und feuchten Versatz. Ansonsten Ergebnis der Konvergenzberechnung.
Konvergenz	Die Feuchteabhängigkeit wird über den Versatzwiderstandsparameter G2 eingestellt. Für feuchten Versatz beträgt der Wert 10.000 und für trockenen Versatz 100. Der Wärmeeinfluss auf die Kompaktion wird über den Parameter Floc gesteuert. Für detailliertere Informationen siehe /LAR 13/. Floc und G2 für die verschiedenen Materialgebiete sind: RICHO: Floc = $9,60 \cdot 10^{-01}$, G2 = 10.000,00 RICHW: Floc = $6,00 \cdot 10^{-01}$, G2 = 10.000,00 QUERW: Floc = $1,19 \cdot 10^{-01}$, G2 = 100,00 QUER: Floc = $1,19 \cdot 10^{+00}$, G2 = 100,00
Intrinsische Permeabilität	Die Permeabilität wird in TOUGH2 aus der Porosität abgeleitet („Poro-Perm-Beziehung“). Es wird gemäß Empfehlung aus /WIE 12/ die mit Spindelöl gemessene Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung benutzt. Diese ergibt größere Permeabilitäten als die mit Messungen mit Lauge, bei welchen die Wechselwirkung zwischen Lauge und Salzgrus eine Rolle spielt. Die Permeabilität von Salzgrusversatz für Lauge bei niedrigen Sättigungen ist nicht bekannt, weshalb auf die mit Spindelöl gemessene Permeabilität zurückgegriffen wird. Für detailliertere Informationen, siehe Kap. 4.4.2

Tab. A.8 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen (Fortsetzung)

<p>Kapillardrücke und relative Permeabilitäten</p>	<p>Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf.</p> <p>Die Kapillardrücke sind abhängig von der Porosität. Daher wird die aus Laborversuchen ermittelte Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung gemäß der Leverett-Funktion für gegebene Porositäten umgerechnet /WIE 12/. Laut /KRÖ 09/ ergeben Messungen für Sandsteine $a = 2/5$. Aus Unkenntnis der Verhältnisse für Salzgrus wird auf die klassische Leverett-Funktion mit $a = 0,5$ zurückgegriffen:</p> <p>Skalierungsfunktion:</p> $p_{cap} = p_{cap,ref} * \left(\frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{k}{k_{ref}} \right)$ <p>Φ = Porosität Φ_{ref} = Referenz Porosität 0,05 k = Permeabilität (m²) k_{ref} = Referenz Permeabilität (3·10⁻¹⁵ m²) $\alpha = 1/2$</p> <p>Als Referenz-Kapillardruckkurve dienen aus Mangel an experimentellen Daten für Salzgrus die für Kochsalz ermittelten Werte (geringes Korngrößenspektrum).</p> <p>Kapillardruckkurve bei Referenzbedingungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Van-Genuchten-Kurve /PRU 99/ mit $\lambda = 0,73$, $P_0 = 5$ kPa, $S_{liq,res,pcap} = S_{gas,res,pcap} = 0$ • Laut /KRÖ 09/, /WIE 12/ wurde für Kochsalz eine residuale Sättigung von $S_{liq,res,pcap} = 0,18$ ermittelt. Dieser Wert lässt sich nicht halten, da man mit $S_{liq} = S_{initial} = 0,01$ bereits in Sättigungsbereiche gerät, in welchen die van-Genuchten-Kurve nicht definiert ist. Die Wahl $S_{liq,res,pcap} = 0$ erfolgt in Ermangelung experimenteller Daten. Durch diese Wahl ist damit zu rechnen, dass die für Kochsalz vorgenommene Kurvenanpassung sich verschlechtert. <p>Relative Permeabilitäten:</p> <p>Aus Mangel an experimentellen Daten wird auf die Corey-Kurve zurückgegriffen.</p> <p>Die residuale Wassersättigung wird auf 0,001 gesetzt. Hiermit ist die in den Querschlagen initial enthaltene Wassermenge immobil, in den Richtstrecken ist jedoch wegen der höheren Anfangssättigung eine Mobilität gegeben. Die genaue Sättigungsgrenze für die Mobilität des Porenwassers ist derzeit nicht ausreichend erforscht. Bei der geringen Feuchte in den Querschlagen ist jedoch nicht davon auszugehen, dass ein durchgehender Wasserfilm vorhanden ist.</p> <p>Die residuale Gassättigung wird auf 0,005 gesetzt, da Wassersättigungen nahe 1 bei sehr kleinen Porositäten das Konvergenzverhalten der Gleichungslöser verschlechtern.</p> <p>Corey-Kurve /PRU 99/:</p> <p>mit $S_{gas,res,kre} = 0,005$ und $S_{liq,res,krel} = S_{initial} = 0,001$</p>
--	--

Tab. A.8 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen (Fortsetzung)

Initiale Flüssigkeitssättigung	<p>0,000677034 für trockenen Versatz ($X_{MgCl_2} = 0,02$ Gew.% MgCl₂-Lösung, bergfeucht, laut /WIE 12/)</p> <p>0,01809667 für feuchten Versatz ($X_{MgCl_2} = 0,6$ Gew.% MgCl₂-Lösung, laut /WIE 12/)</p> $S_{initial} = \frac{\rho_{salt}}{\rho_{MgCl_2}} * \frac{1 - \phi}{\phi} * X_{MgCl_2}$ <p>$\rho_{MgCl_2} = 1330$ kg/m³ (Dichte Magnesiumchlorid-Lauge)</p> <p>$\rho_{salt} = 2160$ kg/m³ (Dichte Steinsalz)</p> <p>$\Phi = 0,35$ (Porosität Salzgrusversatz)</p> <p>$X_{MgCl_2} =$ Gew.-% MgCl₂-Lauge</p>
Material	Infrastrukturbereich (Basalt-Serpentinit-Schotter)
TOUGH2-Materialgebiete	INFRA
Porosität	<p>0.38</p> <p>Quelle: /MÜL 12b/, /MÜL 12a/</p>
Konvergenz	Der Basaltschotter wird als nicht kompaktierbar angenommen.
Intrinsische Permeabilität	<p>1·10⁻⁸ m²</p> <p>Laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ liegt die Permeabilität zwischen 1·10⁻⁷ m² und 1·10⁻⁹ m². Es wurde der Mittelwert gewählt. Der Infrastrukturbereich bildet keine Strömungsbarriere, daher ist die Permeabilität wahrscheinlich nicht sensitiv.</p>
Kapillardrücke und relative Permeabilitäten	<p>Aus Mangel an experimentellen Daten wird auf die Corey-Kurve zurückgegriffen.</p> <p>Die residuale Gas- und Wassersättigung wird auf 0,01 gesetzt. Diese Annahme erfolgte aus Gründen der numerischen Stabilität.</p> <p>Corey-Kurve mit:</p> <p>S_{gas,res,krel} = 0,01 und S_{liq,res,krel} = S_{initial} = 0,01</p>
Initiale Flüssigkeitssättigung	<p>0,0584</p> <p>Es wird davon ausgegangen, dass ein Laugennest mit einem Volumen von 5100 m³ /BEU 12/ zum Zeitpunkt t = 0 in den Infrastrukturbereich entleert und homogen im Porenraum verteilt ist</p> <p>Berechnungsgrundlage:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volumen des Infrastrukturbereiches: $V_{infra} = 220.000$ m³ + 10.000 m³ /BOL 11/ • Porenvolumen Infrastrukturbereich: $V_{infra} * \Phi$ • Lösungsvolumen Laugennest: $V_{lauge} = 5100$ m³ <p>Initiale Sättigung: $\frac{V_{lauge}}{V_{infra} * \Phi}$</p>

Tab. A.8 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen (Fortsetzung)

Material	Einlagerungsgebiete: (trockener Salzgrusversatz)
TOUGH2- Materialgebiete	EINL1-9
Analogie	Daten wie für Materialgebiet RICHO, RICHW, QUERW, QUER bis auf folgende Daten:
Konvergenz	<p>Die Feuchteabhängigkeit wird über den Versatzwiderstandsparameter G2 eingestellt. Für feuchten Versatz beträgt der Wert 10.000 und für trockenen Versatz 100. Der Wärmeeinfluss auf die Kompaktion wird über den Parameter Floc gesteuert. Für detailliertere Informationen siehe /LAR 13/.</p> <p>Floc und G2 für die Einlagerungsstrecken sind:</p> <p>EINL1: Floc = $1,19 \cdot 10^{-01}$, G2 = 100</p> <p>EINL2-4: Floc = 9,50, G2 = 100</p> <p>EINL5-9: Floc = $1,19 \cdot 10^{-01}$, G2 = 100</p>
Intrinsische Permeabilität	<p>Für die Einlagerungsfelder im Osten beträgt die Anfangspermeabilität $1,30 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$.</p> <p>Für die Einlagerungsfelder im Westen beträgt die Permeabilität $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$</p> <p>Im Westflügel (EINL5-EINL9) sind die Behälter volumenmäßig in den Einlagerungsstrecken enthalten (und durch Salzgrus ersetzt). Es kann eine geringere Anfangspermeabilität als durch die Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung vorgegeben, angenommen werden, wegen des Vorhandenseins der Behälter. Genaue Werte sind unbekannt, da die Abfallgebinde in dieser Hinsicht nicht charakterisiert sind.</p>

A.3 Anhang zu Kap. 4.2.2 – Umsetzung der Schächte und der Erkundungssohle

A.3.1 Weitere Parameter zum Schacht für das Programm TOUGH2

Die Zuweisung und Nummerierung der „TOUGH2-Materialgebiete“ in den folgenden Tabellen erfolgte von der Einlagerungssohle aus, beginnt also mit dem unteren Widerlager als „SCH01“:

Tab. A.9 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht

Material	Schacht: Widerlager (Sorelbeton)
TOUGH2-Materialgebiete	SCH01
Analogie	Daten wie für Materialgebiet WDL/PFR (Widerlager/Pfropfen, Sorelbeton), wegen Materialgleichheit /MÜL 12b/, /MÜL 12a/.
Material	Schacht: 3.tes Dichtelement (Sorelbeton)
TOUGH2-Materialgebiete	SCH02
Analogie	Daten wie für Materialgebiet DAMM, wegen Materialgleichheit /MÜL 12b/, /MÜL 12a/.
Material	Schacht: Widerlager Speicher (Basalt/Serpentinitotter)
TOUGH2-Materialgebiete	SCH03
Analogie	Alle Modellparameter wie für Materialgebiet INFRA (Infrastrukturbereich) bis auf:
Porosität	<p>0,326</p> <p>An dieses Schachtelement ist der Infrastrukturbereich der Erkundungssohle angeschlossen. Das Volumen dieses eingebrachten Basaltschotters dient als Speicherraum und zur Aufsättigung der Flüssigkeit mit MgCl₂ /MÜL 12b/.</p> <p>Das Volumen des Infrastrukturbereiches der Erkundungssohle beträgt 110.000 m³. Bei einer Porosität des Eingebrachten Basaltschotters von 38 % ergibt sich ein Hohlraumvolumen von 41.800 m³ /BOL 12/. Dazu werden noch 19.000 t Bischofit eingebracht. Dies reduziert das Hohlraumvolumen um 12.000 m³. Damit ergibt sich ein Hohlraumvolumen von 29.800 m³. Das Elementvolumen wird auf die beiden Schächte aufgeteilt. Dies entspricht 14.900 m³ (Infrastrukturbereich) + 3016 m³ (Eigenvolumen des Schachtelementes) = 17.916 m³. Dieser Wert errechnet sich aus 0,326 * 55.000 m³.</p>
Intrinsische Permeabilität	<p>1·10⁻⁹ m²</p> <p>Laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ liegt die Permeabilität zwischen 1·10⁻⁷ m² und 1·10⁻⁹ m². Es wurde die geringere Permeabilität des gestauchten Basaltschotters im Schacht angenommen.</p>

Tab. A.9 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht (Fortsetzung)

Kapillardrücke und relative Permeabilitäten	<p>Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf.</p> <p>Aus Mangel an experimentellen Daten wird für die Berechnung der relativen Permeabilität die Corey-Kurve verwendet.</p> <p>Die residuale Gas- und Wassersättigung wird auf 0,01 gesetzt. Diese Annahme erfolgte aus Gründen der numerischen Stabilität.</p> <p>Corey-Kurve mit:</p> <p>S_{gas,res,krel} = 0,01 und S_{liq,res,krel} = S_{initial} = 0,01</p> <p>Die Berechnung der Kapillardrücke ist ausgeschaltet.</p>
Initiale Flüssigkeitssättigung	<p>0,0659</p> <p>Aufgrund der Einbringtechnik enthält der Basaltschotter 1 Gew.% Lösung /MÜL 12b/, /MÜL 12a/. (Annahme: keine lateralen Zuflüsse zum Schacht).</p> $S_{initial} = \frac{\rho_{Basalt}}{\rho_{MgCl2}} * \frac{1 - \Phi}{\Phi} * X_{MgCl2}$ <p>$\rho_{MgCl2} = 1330 \text{ kg/m}^3$</p> <p>$\rho_{Basalt} = 2600 \text{ kg/m}^3$</p> <p>$\Phi = 0,23$</p> <p>$X_{MgCl2} = \text{Gew.\% MgCl}_2\text{-Lauge}$</p>
Material	Schacht: Widerlager, 2.tes Dichtelement und Opferschicht (Salzbeton Typ Asse)
TOUGH2-Materialgebiete	SCH04
Anmerkung	<p>In dem Materialgebiet SCH04 wurden vier Schichten aufgrund ihrer gleichen Materialzusammensetzung (Salzbeton Typ Asse) zusammengefasst. Es wurden zwei Widerlager mit jeweils einer Mächtigkeit von 25 m, das 2. Dichtelement mit 70 m Mächtigkeit und eine Opferschicht mit 10 m Mächtigkeit zusammengefasst.</p>
Porosität	<p>0,1</p> <p>/MÜL 12b/, /MÜL 12a/</p>
Konvergenz	Der Salzbeton wird als nicht kompaktierbar angenommen.

Tab. A.9 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht (Fortsetzung)

<p>Intrinsische Permeabilität</p>	<p>1,3 E-18 m²</p> <p>Das Material des angrenzenden Gebirges ist nicht bekannt. Es wird konservativer Weise davon ausgegangen, dass sich die ALZ nicht verändert. (zu prüfen)</p> <p>Es wurde der Mittelwert der Permeabilität aus allen vier Schichten errechnet. Die unterschiedlichen Durchmesser können vernachlässigt werden. Gemittelte Permeabilität der vier Schichten nach Therzag: $\frac{\sum di}{\sum ki}$</p> <p>di = Mächtigkeit der jeweiligen Schicht [m] ki = Permeabilität der jeweiligen Schicht [m]</p> <table border="1" data-bbox="480 663 1414 949"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Mächtigkeit [m]</th> <th>Durchmesser [m]</th> <th>Permeabilität [m²]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Opferschicht</td> <td>10</td> <td>7,63</td> <td>2,00·10⁻¹⁵</td> </tr> <tr> <td>fiktives Widerlager</td> <td>25</td> <td>8,83</td> <td>2,00·10⁻¹⁵</td> </tr> <tr> <td>2. Dichtelement</td> <td>70</td> <td>9,03</td> <td>7,00·10⁻¹⁹</td> </tr> <tr> <td>fiktives Widerlager</td> <td>25</td> <td>8,83</td> <td>2,00·10⁻¹⁵</td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td>130</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Mittlere Durchlässigkeit</td> <td>1,30·10⁻¹⁸</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Material	Mächtigkeit [m]	Durchmesser [m]	Permeabilität [m ²]	Opferschicht	10	7,63	2,00·10 ⁻¹⁵	fiktives Widerlager	25	8,83	2,00·10 ⁻¹⁵	2. Dichtelement	70	9,03	7,00·10 ⁻¹⁹	fiktives Widerlager	25	8,83	2,00·10 ⁻¹⁵	Summe	130			Mittlere Durchlässigkeit	1,30·10 ⁻¹⁸		
Material	Mächtigkeit [m]	Durchmesser [m]	Permeabilität [m ²]																										
Opferschicht	10	7,63	2,00·10 ⁻¹⁵																										
fiktives Widerlager	25	8,83	2,00·10 ⁻¹⁵																										
2. Dichtelement	70	9,03	7,00·10 ⁻¹⁹																										
fiktives Widerlager	25	8,83	2,00·10 ⁻¹⁵																										
Summe	130																												
Mittlere Durchlässigkeit	1,30·10 ⁻¹⁸																												
<p>Kapillardrücke und relative Permeabilitäten</p>	<p>Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf.</p> <p>Gaseindringdruck: 0,885 MPa</p> <p>Die Parametrisierung erfolgt hier mit dem Ziel, einen bestimmten Gaseindringdruck einzustellen. Der Gaseindringdruck wird relevant, wenn die Barriere aufgesättigt ist und Endlagergase ausströmen. Zu diesem Zeitpunkt ist die EDZ voraussichtlich geschlossen (Selbstheilung). Es kann daher der Gaseindringdruck des Salzbetons verwendet werden. Salzbeton (ohne ALZ) zeigt laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ einen Gaseindringdruck zwischen 0,66 MPa – 1,11 MPa. Für die VSG wird der Mittelwert verwendet, da die Konservativität einer Über- oder Unterschätzung nicht bekannt ist. Der Gaseindringdruck wird über die Wahl der Kapillardruckkurve eingestellt.</p> <p>Kapillardruckkurve:</p> <ul style="list-style-type: none"> Van-Genuchten-Kurve mit n = 1,5 (d. h. λ = 0,333), P₀ = 0,885 MPa, S_{liq,res,pcap} = S_{gas,res,pcap} = 0. Einführung einer oberen Kapillardruckgrenze aus numerischen Gründen: p_{cap,cut-off} = 1·10⁸ Pa. Da für Salzbeton keine Werte vorliegen, wurde aufgrund der Materialgleichheit das n von Sorelbeton gemäß /POP 06/ verwendet. <p>Relative Permeabilitäten:</p> <ul style="list-style-type: none"> Corey-Kurve mit S_{liq,res,krel} = 0 und S_{gas,res,krel} = 0 <p>Bei S_{liq,res,krel} handelt es sich um eine Flüssigkeitssättigung, bei S_{gas,res,krel} um eine Gassättigung. Beide Werte wurden aus numerischen Gründen auf null gesetzt..</p>																												
<p>Initiale Flüssigkeitssättigung</p>	<p>0,85</p> <p>Laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/</p>																												

Tab. A.9 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht (Fortsetzung)

Material	Schacht: Langzeitdichtung (verdichteter, feuchter Salzgrus)
TOUGH2-Materialgebiete	SCH05
Analogie	Daten wie für Materialgebiet RICHO, RICHW, QUERW, QUER bis auf folgende Daten:
Porosität	0,10 (initial) Quelle: /MÜL 12b/, /MÜL 12a/
Konvergenz	Die Feuchteabhängigkeit wird über den Versatzwiderstandsparameter G2 eingestellt. Für feuchten Versatz beträgt der Wert 10.000 und für trockenen Versatz 100. Der Wärmeeinfluss auf die Kompaktion wird über den Parameter Floc gesteuert. Der Konvergenzansatz ist der Gleiche wie für Salzgrus unter Berücksichtigung der Vorkompaktierung. Für detailliertere Informationen siehe /LAR 13/. Floc und G2 für die Langzeitdichtung sind: SCH05: Floc = 0,6, G2 = 10.000
Intrinsische Permeabilität	1·10⁻¹⁴ m² (Mittelwert) Quelle: /MÜL 12b/, /MÜL 12a/
Initiale Flüssigkeitssättigung	0,21924812 ($X_{MgCl_2} = 1,5$ Gew.% MgCl ₂ -Lösung laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/) $S_{initial} = \frac{\rho_{salt}}{\rho_{MgCl_2}} * \frac{1 - \Phi}{\Phi} * X_{MgCl_2}$ $\rho_{MgCl_2} = 1330 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{salt} = 2160 \text{ kg/m}^3$ $\Phi = 0,1$ $X_{MgCl_2} = 1,5 \text{ Gew.}\%$
Material	Schacht: Widerlager Speicher (Basalt/Serpentiniteschotter)
TOUGH2-Materialgebiete	SCH06
Analogie	Alle Daten wie für Materialgebiet INFRA bis auf folgende Parameter
Porosität	0,23 Die Porosität des Schotters hängt von der Einbringtechnologie ab, bei Anwendung der Versturztechnologie, z. B. über API Falleleitungen, kann die Porosität des Schotters auf bis zu 23 % absinken, wobei eine Kornzertrümmerung stattfindet. Quelle: /MÜL 12b/, /MÜL 12a/
Intrinsische Permeabilität	1·10⁻⁹ m² Laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ liegt die Permeabilität des Schotters zwischen 1·10 ⁻⁷ m ² und 1·10 ⁻⁹ m ² . Die Permeabilität wird wegen der geringeren Porosität niedriger als die Permeabilität für den Infrastrukturbereich gewählt.

Tab. A.9 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht (Fortsetzung)

Kapillardrücke und relative Permeabilitäten	<p>Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf.</p> <p>Aus Mangel an experimentellen Daten wird für die Berechnung der relativen Permeabilität die Corey-Kurve verwendet.</p> <p>Die residuale Gas- und Wassersättigung wird auf 0,01 gesetzt. Diese Annahme erfolgte aus Gründen der numerischen Stabilität.</p> <p>Corey-Kurve mit:</p> <p>S_{gas,res,krel} = 0,01 und S_{liq,res,krel} = S_{initial} = 0,01</p> <p>Die Berechnung der Kapillardrücke ist ausgeschaltet.</p>
Initiale Flüssigkeitssättigung	<p>0,0659</p> <p>Aufgrund der Einbringtechnik 1 Gew.% MgCl₂-Lösung. Annahme: keine lateralen Zuflüsse zum Schacht /MÜL 12b/, /MÜL 12a/.</p> $S_{initial} = \frac{\rho_{basalt}}{\rho_{MgCl_2}} * \frac{1 - \Phi}{\Phi} * X_{MgCl_2}$ <p>$\rho_{MgCl_2} = 1330 \text{ kg/m}^3$</p> <p>$\rho_{basalt} = 2600 \text{ kg/m}^3$</p> <p>$\Phi = 0,23$</p> <p>$X_{MgCl_2} = 1 \text{ Gew.}\%$</p>
Material	Schacht: Gebirgsverbundenes Widerlager (Salzbeton)
TOUGH2-Materialgebiet	SCH07
Porosität	<p>0,23</p> <p>Keine Angaben zur Porosität. Das Widerlager ist dräniert. Vorläufig wird die gleiche Porosität wie vom Schotter angenommen.</p> <p>Quelle: /MÜL 12b/, /MÜL 12a/.</p>
Intrinsische Permeabilität	<p>1·10⁻⁹ m²</p> <p>Das Widerlager ist dräniert und bietet keinen hydraulischen Widerstand. Deshalb kann die gleiche Permeabilität wie vom Schotter angenommen werden /MÜL 12b/, /MÜL 12a/.</p>
Kapillardrücke und relative Permeabilitäten	<p>Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf.</p> <p>Aus Mangel an experimentellen Daten wird für die Berechnung der relativen Permeabilität die Corey-Kurve verwendet.</p> <p>Die residuale Gas- und Wassersättigung wird auf 0,01 gesetzt. Diese Annahme erfolgte aus Gründen der numerischen Stabilität.</p> <p>Corey-Kurve mit:</p> <p>S_{gas,res,krel} = 0,01 und S_{liq,res,krel} = S_{initial} = 0,01</p> <p>Die Berechnung der Kapillardrücke ist ausgeschaltet.</p>

Tab. A.9 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht (Fortsetzung)

Material	Schacht: Filter und Aufsättigungselemente (Kies, Sand)
TOUGH2-Materialgebiete	SCH08, SCH10
Porosität	0,30 Die Porosität liegt zwischen 25 % und 35 %. Es wird der Mittelwert von 30 % verwendet. Quelle: /MÜL 12b/, /MÜL 12a/
Konvergenz	Das Aufsättigungselement wird als nicht kompaktierbar angenommen.
Intrinsische Permeabilität	$1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ Für die Permeabilität wird ein Bereich von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ angegeben /MÜL 12b/, /MÜL 12a/. Es wird ein mittlerer Wert von $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ verwendet.
Kapillardrücke und relative Permeabilitäten	Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf. Aus Mangel an experimentellen Daten wird für die Berechnung der relativen Permeabilität die Corey-Kurve verwendet. Die residuale Gas- und Wassersättigung wird auf 0,01 gesetzt. Diese Annahme erfolgte aus Gründen der numerischen Stabilität. Corey-Kurve mit: $S_{\text{gas, res, krel}} = 0,01$ und $S_{\text{liq, res, krel}} = S_{\text{initial}} = 0,01$ Die Berechnung der Kapillardrücke ist ausgeschaltet.
Initiale Flüssigkeitssättigung	1 für SCH10 Volle Flüssigkeitssättigung, wegen Anbindung an das Deckgebirge /MÜL 12b/, /MÜL 12a/. 0,1 für SCH08 Die Filterelemente schließen das 1. Dichtelement aus Bentonit ein und gewährleisten die Filterstabilität des Dichtelementes. Das Filterelement oberhalb des Bentonitdichtelementes dient bei Notwendigkeit auch als Aufsättigungszone für möglicherweise untersättigte Deckgebirgswässer. Um eine bautechnisch sachgerechte Verdichtung herstellen zu können, wird pauschal eine Einbaufeuchte von 10 Vol.% angesetzt /MÜL 12b/, /MÜL 12a/.
Initialer Druck	$4,61 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ Das oberste Schachtelement SCH10 steht mit den Deckgebirgswässern (Grundbedingung Dichte Deckgebirgswässer: 1200 kg/m^3) in Verbindung, somit steht dort bei einer Tiefe von 350 m und einem Meeresspiegel (Dichte Meerwasser: 1000 kg/m^3) von 50 m über der Oberfläche, dieser hydrostatischer Druck an.

Tab. A.9 Materialeigenschaften und Anfangsbedingungen: Schacht (Fortsetzung)

Material	Schacht: Bentonit-Dichtelement
TOUGH2-Materialgebiete	SCH09
Porosität	0,3 In /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ wird eine Gesamtporosität zwischen 27 Vol.-% und 34 Vol.-% angegeben.
Intrinsische Permeabilität	$7,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$, zeitlich konstant Laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/ integrale Permeabilität (mit ALZ) zwischen $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $7,8 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Über längere Zeiträume ist mit einer Senkung der Permeabilität zu rechnen.
Kapillardrücke und relative Permeabilitäten	Hinsichtlich der Zweiphasenflussparameter besteht F&E-Bedarf. In Ermangelung experimenteller Befunde wird auf die in /SEN 08/ angegebenen Kenndaten zurückgegriffen: Kapillardruck-Kurve: <ul style="list-style-type: none"> • Van-Genuchten-Kurve mit $n = 1.82$, $\lambda=0,4505$, $P_0 = 1 \text{ MPa}$, • $S_{\text{liq, res, pcap}} = 0$, $S_{\text{gas, res, pcap}} = 0$. Cut-off: $1 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ aus Gründen der numerischen Stabilität <ul style="list-style-type: none"> • Quelldruck: 1 MPa laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/. Nach /HAR 03/ (S. 52) ist der Quelldruck gleich dem Gaseindringdruck. • Quelle für n, $S_{\text{liq, res, pcap}}$: /SEN 08/ Relative Permeabilitäten: <ul style="list-style-type: none"> • Grant-Kurve mit $S_{\text{liq, res, krel}} = 0.302427$ und $S_{\text{gas, res, krel}} = 0,187765$ • Quelldruck laut /MÜL 12b/, /MÜL 12a/: 1 MPa ist etwa gleich Gaseindringdruck <p>Die Parametrisierung erfolgt hier mit dem Ziel, einen bestimmten Gaseindringdruck einzustellen. Der Gaseindringdruck soll hier als Fließschwellwert für die Gasphase implementiert werden. Dies geschieht über die Wahl der residualen Gassättigung für die Relative-Permeabilitäts-Funktion, wodurch die Abwesenheit von Gasflüssen bei Drücken unterhalb des Gaseindringdruckes gewährleistet wird. Als Relative-Permeabilitäts-Funktion wird die Grant-Kurve gewählt, die im Gegensatz zur oft verwendeten Corey-Kurve einen deutlicheren Schwellwert für den Gasfluss einführt.</p>
Initiale Flüssigkeitssättigung	0.45 Quelle: /MÜL 12b/, /MÜL 12a/

A.4 Anhang zu Kap. 4.2.3 – Umsetzung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz

Die einzelnen Faktoren sind hier im Folgenden kurz dargestellt. Nähere Angaben zur Beschreibung der Faktoren enthält /RÜB 10/.

$$f_t = 1 + \frac{A}{\lambda_s + \ln(V_0/V)} \quad (\text{A.4.1})$$

$$A = \lambda_s \cdot \left(\frac{K_0(z_{ref})}{K_{ref} \cdot f_\phi(\phi_0)} - 1 \right) \quad (\text{A.4.2})$$

V_0	Anfangsvolumen zum Zeitpunkt $t = 0$
V	Volumen zum Zeitpunkt t
λ_s	Angepasst aus Gebirgsmechanischen Rechnungen
$K_0(z_{ref})$	Konvergenzrate zum Zeitpunkt $t = 0$ in der Referenztiefe z_{ref}

$$f_p(p) = \left(1 - \frac{P(z, t) - P_{atm}}{P_G(z)} \right)^m \quad (\text{A.4.3})$$

m	Spannungsexponent
$P(z, t)$	Fluiddruck zum Zeitpunkt t in der Teufe z
P_{atm}	Atmosphärendruck
$P_G(z)$	lokaler Gebirgsdruck in der Teufe z

$$f_\phi(\phi, \phi_r) = \left[1 + \frac{h(\phi, \phi_r)}{(\phi \cdot g(\phi, \phi_r))^{1/m}} \right]^{-m} \quad \text{für } \phi < \phi_0 \quad (\text{A.4.4})$$

$$h(\phi, \phi_r) = h_0 + h_1 \frac{\phi}{\phi_r} + h_2 \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^2 + h_3 \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^3 \quad (\text{A.4.5})$$

$$g(\phi, \phi_r) = g_0 + g_1 \frac{\phi}{\phi_r} + g_2 \left(\frac{\phi}{\phi_r} \right)^2 \quad (\text{A.4.6})$$

$h_0, h_1, h_2, h_3, g_0, g_1, g_2$ Parameter für die Stützfunktion

ϕ Versatzporosität ($\phi \geq \phi_r$)

ϕ_r Referenzporosität

$$f_T(T) = \frac{1}{1+a} \cdot \exp\left(\frac{Q_1}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_G(z_{\text{ref}})} - \frac{1}{T(z)}\right)\right) \cdot \left[1 + a \cdot \exp\left(\frac{\Delta Q}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_G(z)} - \frac{1}{T(z)}\right)\right)\right] \quad (\text{A.4.7})$$

Q_1, Q_2 Aktivierungsenergien der Kriechprozesse

R Allgemeine Gaskonstante

$\Delta Q = Q_1 - Q_2$ Differenz der Aktivierungsenergien

$T_G(z_{\text{ref}})$ Gebirgstemperatur in der Referenztiefe

$\Delta z = z - z_{\text{ref}}$ Abstand zur Referenztiefe

$T_G(z) = T_G - \Delta z \cdot \nabla T$ lokale Gebirgstemperatur in der Teufe z

∇T geothermischer Temperaturgradient

$T(z) = \Delta T + T_G(z)$ lokale Temperatur in der Teufe z

ΔT Temperaturerhöhung über die lokale Gebirgstemperatur

Berechnung des Faktors f_{loc}

Der Feuchtegehalt des Salzgrusversatzes wird bei der Berechnung des Faktors f_ϕ (Gleichung A.4.4) durch einen unterschiedlichen Wert für den Parameter g_2 berücksichtigt /RÜB 10/. Für trockenen Salzgrus wird $g_2 = 100$ und für feuchten $g_2 = 10.000$ gesetzt. Die in Tab. 4.3 angegebenen Zeiten zum Erreichen von 5 % Porosität müssen daher durch unterschiedliche Werte für den Faktor f_{loc} für trockenen und feuchten Salzgrus unter Atmosphärendruck approximiert werden. Die entsprechenden Werte für f_{loc} sind in Tab. A.10 angegeben, weitere Parameter für den vereinfachten Kompaktionsansatz in Tab. A.11 wiedergegeben.

Tab. A.10 Faktor f_{loc} zum Erreichen der in Tab. 4.3 gegebenen Zeitpunkte mit der Referenzkonvergenzrate $0,01 \text{ a}^{-1}$

Zeitpunkte t' bis zum Erreichen von $\Phi(t=t') = 5 \%$ (s. Tab. 4.3)	f_{loc}	
	Trockener Versatz $g_2 = 100$	Feuchter Versatz $g_2 = 10.000$
10 a	9,5	4,8
50 a	1,9	0,96
80 a	1,1875	0,6
100 a	0,95	0,48
200 a	0,475	0,24
800 a	0,11875	0,06
1000a	0,095	$4,8 \cdot 10^{-2}$

Die in den Modellrechnungen verwendeten Zahlenwerte sind hervorgehoben.

Tab. A.11 Weitere Parameter des Kompaktionsansatzes

Parameter		Wert
h_0	-	1
h_1	-	-2
h_2		1
h_3		-2
g_0	-	1
g_1	-	-1
λ_s	-	$1 \cdot 10^{-6}$
Referenzkonvergenzrate K_{ref}	a^{-1}	0,01
Referenzporosität ϕ_r	-	0,3
Konvergenzrate zum Zeitpunkt $t = 0$ $K_0(z_{ref})$	a^{-1}	0,01
Exponent m	-	4
Aktivierungsenergie Q	$\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1}$	n. a.*
Atmosphärendruck p_{atm}	Pa	$1 \cdot 10^5$

* aufgrund des gewählten vereinfachten Kompaktionsansatzes nicht anwendbar

A.5 Anhang zu Kap. 4.3.2 – Quellterm der Radionuklidmobilisierung

Tab. A.12 Anzahl der Kokillen und der Brennelemente bezogen auf die Altersklasse bzw. die Inbetriebnahme des Endlagers im Jahr 2035 sowie die korrespondierende Schwermetallmasse der Brennelemente /PEI 11a/

Abfallart	Anzahl BE / Masse [tSM]	Anzahl der Kokillen und BE bzw. Schwermetallmasse der BE pro Altersklasse [a] bezogen auf die Inbetriebnahme des Endlagers im Jahr 2035							
		10 - 14	15- 19	20 - 24	25 - 29	30 - 34	35- 39	40- 44	45- 50
	Anzahl								
CSD-V	Kokillen					500	360	1.310	1.565
CSD-B	Kokillen					41	30	109	128
CSD-C	Kokillen					550	395	1.445	1.714
DWR UO2	BE	1.220	1.580	2.150	3.200	2.550	1.600	150	
DWR MOX	BE	60	110	160	700	450	50		
SWR UO2	BE	780	1.730	2.190	5.450	3.550	450	200	
SWR MOX	BE	110		340	350	450			
WWER-DWR	BE							5.050	
	Masse								
DWR UO2	tSM	635	820	1.120	1.680	1.300	800	60	
DWR MOX	tSM	30	60	85	360	210	20		
SWR UO2	tSM	135	295	370	950	610	75	30	
SWR MOX	tSM	20		60	60	80			
WWER-DWR	tSM							580	

Tab. A.13 Streckengenaue Aufstellung der Belegung der Einlagerungsstrecken nach Behältertyp und Abfallart im MARNIE-Modell (Einlagerungsvariante AB1)

EL Feld-Nr.	P-Module	Anzahl Strecken	Behälteranzahl pro Strecke	Behältertyp	Abfallart
Ost 1					
Ost 1.1 bis 1.2	602 – 604	2	61	CASTOR®-THTR	AVR
Ost 1.3a	606	1	31	CASTOR®-THTR	THTR
Ost 1.3b	606	1	30	CASTOR®-THTR	AVR
Ost 1.4 bis 1.7	608 – 614	4	61	CASTOR®-THTR	THTR
Ost 1.8a	616	1	30	CASTOR®-THTR	THTR
Ost 1.8b	616		30	CASTOR®-MTR2	FRM II
Ost 1.8c	616		12	CASTOR®-MTR2	BERII
Ost 1.8d	624		4	CASTOR®-KNK	KNK
Ost 1.9a	618	1	8	CASTOR®-MTR2	BERII
Ost 1.9b	618		32	POLLUX®-CSD	CSD-C
Ost 1.10	620	1	35	POLLUX®-CSD	CSD-B
Ost 1.11	622	1	35	POLLUX®-CSD	CSD-C
Ost 2					
Ost 2.1	552	1	35	POLLUX®-CSD	CSD-C
Ost 2.2 bis 2.10	554 – 570	9	35	POLLUX®-CSD	CSD-C
Ost 2.11	572	1	35	POLLUX®-CSD	CSD-C
Ost 2.12a	574	1	4	POLLUX®-CSD	CSD-C
Ost 2.12b	574		18	POLLUX®-9	CSD-V
Ost 2.13 bis 2.18	576-586	6	21	POLLUX®-9	CSD-V

Tab. A.13 Streckengenauere Aufstellung der Belegung der Einlagerungsstrecken nach Behältertyp und Abfallart im MARNIE-Modell (Einlagerungsvariante AB1) (Fortsetzung)

EL Feld-Nr.	P-Module	Anzahl Strecken	Behälteranzahl pro Strecke	Behältertyp	Abfallart
Ost 2.19	588	1	21	POLLUX®-9	CSD-V
Ost 3					
Ost 3.1	502	1	21	POLLUX®-9	CSD-V
Ost 3.2 bis 3.10	504 – 520	9	21	POLLUX®-9	CSD-V
Ost 3.11	522	1	21	POLLUX®-9	CSD-V
Ost 3.12a	524	1	19	POLLUX®-9	CSD-V
Ost 3.12b	530		2	POLLUX®-10	WWER
Ost 3.13 bis 3.14	526 – 528	2	28	POLLUX®-10	WWER
Ost 4					
Ost 4.1 bis 4.7	452 – 464	7	20	POLLUX®-10	WWER
Ost 5					
Ost 5.1a	402	1	4	POLLUX®-10	WWER
Ost 5.1b	402		16	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 5.2 bis 5.6	404 – 412	5	20	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 5.7	414	1	5	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 6					
Ost 6.1 bis 6.3	352 – 356	3	28	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 6.4	358	1	25	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 6.5	360	1	16	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 6.6	362	1	10	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 7					
Ost 7.1 bis 7.8	302 – 316	8	28	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente

Tab. A.13 Streckengenauere Aufstellung der Belegung der Einlagerungsstrecken nach Behältertyp und Abfallart im MARNIE-Modell (Einlagerungsvariante AB1)
(Fortsetzung)

EL Feld-Nr.	P-Module	Anzahl Strecken	Behälteranzahl pro Strecke	Behältertyp	Abfallart
Ost 7.9	318	1	24	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 8					
Ost 8.1 bis 8.10	252 – 270	10	28	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9					
Ost 9.1	202	1	8	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.2	204	1	18	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.3	206	1	26	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.4	208	1	25	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.5	210	1	24	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.6	212	1	22	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.7	214	1	22	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.8	216	1	21	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.9	218	1	20	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.10	220	1	19	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.11	222	1	18	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.12	224	1	17	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.13	226	1	16	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.14	228	1	14	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 9.15	230	1	4	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente

Tab. A.13 Streckengenauere Aufstellung der Belegung der Einlagerungsstrecken nach Behältertyp und Abfallart im MARNIE-Modell (Einlagerungsvariante AB1) (Fortsetzung)

EL Feld-Nr.	P-Module	Anzahl Strecken	Behälteranzahl pro Strecke	Behältertyp	Abfallart
Ost 10					
Ost 10.1 bis 10.16	152 – 182	16	28	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 10.17	184	1	20	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 11					
Ost 11.1 bis 11.8	122 – 136	8	28	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 12					
Ost 12.1 bis 12.5	102 – 110	5	28	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 12.6	112	1	28	POLLUX®-10	DWR/SWR-Brennelemente
Ost 12.7	114	1	2620	Gussbehälter Typ II	Verpresste Strukturteile
West 1					
West 1.1 bis 1.4	952 – 958	4	1575	Konrad Typ VI	Urantails
West 1.5	960	1	917	Konrad Typ VI	Urantails
West 2					
West 2.1	902	1	1068	Konrad Typ IV	Andere Mischabfälle
West 2.2	904	1	627	Konrad Typ IV	Andere Mischabfälle
West 2.3	906	1	1150	Gussbehälter Typ II	Andere Mischabfälle
West 2.4	908	1	800	Betonbehälter Typ I	Andere Mischabfälle
West 3					
West 3.1	994	1	2300	Gussbehälter Typ II	Graphitabfälle

Behältertypen und Belegung gemäß /BOL 11/. Aus der Optimierung von Arbeitspaket 6 /BOL 12/ wurden die Reduzierung der Abfallmengen durch den Ausstieg aus der Kernenergie im Jahr 2022 auf die Felder Ost 1 bis Ost 12, die Einlagerung der Strukturteile im Feld Ost 12.7 und die Reduktion der Abfälle im Feld West 2 berücksichtigt. Lage der P-Module s. Abb. A.2

Tab. A.14 Anteile in der IRF_{Stab} , der Brennstoffmatrix und dem Hüllrohr an dem Inventar eines Brennstabes für die verwendeten Nuklide

Nuklid	Anteil IRF_{Stab}	Anteil Brennstoffmatrix	Anteil Hüllrohr
Be-10	0,000	0,998	0,002
C-14	0,058	0,524	0,418
Cl-36	0,048	0,436	0,515
Ca-41	0,000	0,675	0,325
Ni-59	0,000	0,000	1,000
Ni-63	0,000	0,000	1,000
Se-79	0,000	1,000	0,000
Rb-87	0,000	1,000	0,000
Sr-90	0,010	0,990	0,000
Zr-93	0,000	0,951	0,049
Nb-94	0,000	0,000	1,000
Mo-93	0,000	0,014	0,986
Tc-99	0,001	0,998	0,001
Pd-107	0,001	0,999	0,000
Ag-108m	0,000	1,000	0,000
Sn-126	0,000	1,000	0,000
I-129	0,020	0,980	0,000
Cs-135	0,020	0,980	0,000
Cs-137	0,020	0,980	0,000
Sm-147	0,000	1,000	0,000
Sm-151	0,000	1,000	0,000
Ho-166m	0,000	1,000	0,000
Cm-248	0,000	1,000	0,000
Pu-244+	0,000	1,000	0,000
Pu-240	0,000	1,000	0,000
U-236	0,000	1,000	0,000
Th-232	0,000	1,000	0,000
U-232	0,000	1,000	0,000
Cm-245	0,000	1,000	0,000
Am-241+	0,000	1,000	0,000
Np-237	0,000	1,000	0,000
U-233	0,000	1,000	0,000

Tab. A.14 Anteile in der IRF_{Stab} , der Brennstoffmatrix und dem Hüllrohr an dem Inventar eines Brennstabes für die verwendeten Nuklide (Fortsetzung)

Nuklid	Anteil IRF_{Stab}	Anteil Brennstoffmatrix	Anteil Hüllrohr
Th-229	0,000	1,000	0,000
Cm-246	0,000	1,000	0,000
Pu-242	0,000	1,000	0,000
U-238	0,000	1,000	0,000
Am-242m	0,000	1,000	0,000
Pu-238	0,000	1,000	0,000
U-234	0,000	1,000	0,000
Th-230	0,000	1,000	0,000
Ra-226+	0,000	1,000	0,000
Cm-247	0,000	1,000	0,000
Am-243	0,000	1,000	0,000
Pu-239	0,000	1,000	0,000
U-235	0,000	1,000	0,000
Pa-231	0,000	1,000	0,000
Ac-227	0,000	1,000	0,000

Tab. A.15 Inventare der einzelnen Abfallarten zu Beginn der Nachverschlussphase aus einer MARNIE Rechnung (Zeitpunkt 40,6 Jahre nach Beginn der Einlagerung im Jahre 2035) /SEH 13/

Nuklid	Struktur- teile	DWR-/SWR- /WWER- Brenn- elemente	CSD-V	CSD-C	CSD-B	AVR	THTR	FRM II, BER II, KNK	Sonstige radio- aktive Misch- abfälle	Urantails	Graphit- abfälle
	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
Be-10	1,35E+07	1,47E+11	4,01E+10	8,69E+07	0,00E+00	0,00E+00	2,11E+09	1,28E+09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
C-14	6,23E+12	3,98E+14	6,63E+13	5,62E+13	0,00E+00	2,99E+12	1,60E+12	1,90E+12	2,94E+12	0,00E+00	2,78E+14
Cl-36	2,32E+11	1,14E+13	1,88E+12	2,04E+12	0,00E+00	9,26E+10	4,11E+10	0,00E+00	7,67E+09	0,00E+00	5,80E+10
Ca-41	7,46E+09	6,33E+11	1,41E+11	6,93E+10	0,00E+00	0,00E+00	4,49E+08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Ni-59	4,03E+14	2,23E+15	3,19E+11	9,05E+14	0,00E+00	4,11E+09	1,54E+09	0,00E+00	8,85E+12	0,00E+00	0,00E+00
Ni-63	3,76E+16	2,16E+17	2,73E+13	7,15E+16	0,00E+00	9,48E+08	1,20E+11	2,83E+04	1,06E+15	0,00E+00	0,00E+00
Se-79	8,81E+06	2,95E+13	8,53E+12	7,60E+07	0,00E+00	2,75E+10	1,99E+11	1,11E+11	2,79E+08	0,00E+00	0,00E+00
Rb-87	3,35E+02	1,33E+10	4,08E+09	7,12E+03	0,00E+00	8,38E+06	1,23E+07	1,13E+08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sr-90	3,55E+11	1,15E+19	2,02E+18	3,45E+12	4,36E+15	4,08E+15	6,46E+15	1,35E+17	6,55E+14	0,00E+00	3,19E+12
Zr-93	1,51E+12	1,21E+15	3,41E+14	1,78E+13	0,00E+00	7,42E+11	8,77E+11	1,03E+13	2,48E+11	0,00E+00	0,00E+00
Nb-94	9,66E+13	3,54E+15	5,71E+10	1,04E+15	0,00E+00	2,54E+07	2,12E+10	1,99E+09	3,97E+07	0,00E+00	0,00E+00
Mo-93	1,75E+12	4,92E+13	1,77E+11	1,33E+13	0,00E+00	8,45E+08	9,10E+08	0,00E+00	6,30E+06	0,00E+00	0,00E+00
Tc-99	2,27E+11	9,04E+15	2,64E+15	1,61E+12	0,00E+00	4,08E+12	5,42E+12	8,10E+13	7,61E+11	0,00E+00	0,00E+00
Pd-107	5,31E+06	9,25E+13	1,97E+13	1,61E+08	0,00E+00	6,20E+09	4,79E+09	8,07E+11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Ag-108m	4,46E+06	4,19E+13	1,33E+13	2,12E+08	0,00E+00	0,00E+00	2,03E+10	1,37E+08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Nuklid	Struktur- teile	DWR-/SWR- /WWER- Brenn- elemente	CSD-V	CSD-C	CSD-B	AVR	THTR	FRM II, BER II, KNK	Sonstige radio- aktive Misch- abfälle	Urantails	Graphit- abfälle
	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
Sn-126	2,27E+07	3,87E+14	9,60E+13	6,15E+08	0,00E+00	1,40E+11	1,77E+11	3,41E+12	1,40E+10	0,00E+00	0,00E+00
I-129	9,98E+05	1,92E+13	4,97E+12	2,50E+07	0,00E+00	8,01E+09	1,14E+10	1,68E+11	3,25E+12	0,00E+00	0,00E+00
Cs-135	2,12E+07	3,17E+14	8,21E+13	2,93E+08	0,00E+00	1,43E+11	1,34E+11	2,31E+12	9,79E+09	0,00E+00	0,00E+00
Cs-137	8,86E+11	1,93E+19	3,08E+18	1,10E+13	1,44E+16	4,66E+15	6,94E+15	2,19E+17	1,32E+15	0,00E+00	6,93E+11
Sm-147	2,16E+02	3,06E+09	1,12E+09	3,46E+03	0,00E+00	0,00E+00	2,87E+06	2,57E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sm-151	1,83E+10	1,60E+17	3,49E+16	1,97E+11	0,00E+00	2,66E+13	6,40E+13	1,31E+15	8,17E+11	0,00E+00	0,00E+00
Ho-166m	9,25E+03	8,60E+11	8,18E+10	2,56E+03	0,00E+00	3,62E+05	2,38E+09	8,11E+09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cm-248	1,11E-03	3,63E+09	1,70E+07	1,08E+03	0,00E+00	0,00E+00	4,36E+01	1,22E+07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Pu-244+	8,99E+01	3,19E+11	8,45E+09	2,39E+05	0,00E+00	2,35E+06	2,10E+05	5,24E+09	8,10E+06	0,00E+00	0,00E+00
Pu-240	5,16E+10	4,54E+17	1,14E+15	4,00E+11	0,00E+00	1,29E+13	4,52E+12	3,01E+15	2,43E+13	0,00E+00	0,00E+00
U-236	1,64E+06	1,38E+14	7,72E+10	1,12E+07	0,00E+00	9,38E+10	1,50E+11	1,10E+12	1,13E+10	0,00E+00	0,00E+00
Th-232	3,84E-03	2,29E+08	1,09E+08	4,29E-02	0,00E+00	5,17E+09	2,56E+10	2,74E+03	2,41E+11	0,00E+00	0,00E+00
U-232	2,23E+04	2,32E+13	8,13E+09	1,04E+06	0,00E+00	4,55E+12	2,36E+13	1,59E+11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cm-245	5,52E+04	1,55E+15	2,41E+13	7,11E+08	0,00E+00	5,68E+08	2,01E+08	3,71E+12	9,02E+08	0,00E+00	0,00E+00
Am-241+	3,06E+11	4,05E+18	1,55E+17	8,32E+12	3,56E+13	1,07E+14	3,33E+13	2,52E+16	1,83E+14	0,00E+00	0,00E+00
Np-237	4,08E+06	2,85E+14	6,29E+13	1,95E+08	4,51E+08	8,32E+10	8,02E+10	2,18E+12	2,52E+10	0,00E+00	0,00E+00
U-233	5,99E+02	1,18E+12	2,13E+10	3,38E+04	3,77E+04	8,91E+12	4,79E+13	5,07E+08	8,90E+05	0,00E+00	0,00E+00

Nuklid	Struktur- teile	DWR-/SWR- /WWER- Brenn- elemente	CSD-V	CSD-C	CSD-B	AVR	THTR	FRM II, BER II, KNK	Sonstige radio- aktive Misch- abfälle	Urantails	Graphit- abfälle
	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
Th-229	1,51E+00	6,21E+09	2,74E+08	9,13E+01	4,22E+01	7,58E+10	3,42E+11	3,04E+06	3,20E+02	0,00E+00	0,00E+00
Cm-246	3,31E+03	2,55E+14	3,41E+12	1,30E+08	0,00E+00	2,60E+08	2,81E+07	9,58E+11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Pu-242	4,13E+07	2,76E+15	2,13E+12	3,82E+09	0,00E+00	8,60E+10	1,88E+10	1,70E+13	4,56E+10	0,00E+00	0,00E+00
U-238	1,71E+07	1,27E+14	9,11E+10	5,29E+07	0,00E+00	5,16E+09	5,24E+08	1,40E+12	8,14E+10	1,18E+15	0,00E+00
Am-242m	2,85E+08	1,34E+16	8,42E+14	7,85E+09	0,00E+00	1,42E+11	2,03E+10	3,37E+13	6,07E+10	0,00E+00	0,00E+00
Pu-238	1,00E+10	2,76E+18	2,04E+15	5,90E+11	0,00E+00	3,40E+14	2,68E+14	1,58E+16	1,41E+14	0,00E+00	0,00E+00
U-234	1,59E+07	8,94E+14	9,19E+11	2,18E+08	0,00E+00	1,22E+12	3,64E+12	6,29E+12	3,37E+09	1,99E+14	0,00E+00
Th-230	6,87E+03	3,52E+11	1,56E+10	9,96E+04	0,00E+00	1,06E+09	1,42E+10	2,40E+09	1,28E+05	1,32E+11	0,00E+00
Ra-226+	7,34E+01	4,03E+09	5,33E+08	1,34E+03	0,00E+00	1,39E+07	4,42E+08	2,48E+07	1,29E+11	2,07E+09	0,00E+00
Cm-247	1,86E-03	1,41E+09	8,89E+06	3,95E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,71E+01	3,91E+06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Am-234	9,32E+07	3,59E+16	2,76E+15	4,58E+10	0,00E+00	5,30E+11	7,96E+10	1,99E+14	1,34E+11	0,00E+00	0,00E+00
Pu-239	7,36E+10	2,06E+17	4,09E+14	5,34E+11	0,00E+00	6,31E+12	1,66E+12	1,70E+15	1,60E+13	0,00E+00	0,00E+00
U-235	5,31E+05	5,56E+12	6,15E+09	9,86E+05	0,00E+00	4,73E+09	2,01E+10	5,56E+10	5,22E+09	1,58E+13	0,00E+00
Pa-231	6,43E+02	3,09E+10	7,53E+09	2,16E+03	0,00E+00	6,08E+09	8,00E+10	1,95E+08	9,05E+05	2,45E+10	0,00E+00
Ac-227	3,45E+02	2,42E+10	7,05E+09	1,54E+03	0,00E+00	6,16E+09	7,43E+10	1,38E+08	1,09E+05	1,51E+10	0,00E+00
Gesamt	3,81E+16	3,88E+19	5,30E+18	7,35E+16	1,88E+16	9,25E+15	1,39E+16	4,01E+17	3,42E+15	1,40E+15	2,82E+14

Tab. A.16 Parameter für die Berechnung der Korrosion und der resultierenden Gasbildung für die verschiedenen Endlagerbehälter

Parameter	CASTOR®-Behälter	POLLUX®-9-Behälter	POLLUX®-10-Behälter	Gussbehälter TypII (Strukturteile)	KC-TypVI (Urantails)	KC-TypIV (Graphit, Beton)	Sonstige Abfälle		
							KC-TypIV	Gussbehälter	Betonbehälter Typ I
Einlagerungsvariante	B1	B1	B1	B1	A	A	A	A	A
Materialgebiet	EINL1	EINL2	EINL3	EINL4	EINL5	EINL9	EINL8	EINL7	EINL6
Anzahl Endlagerbehälter	511	906	2.120	2.620	7.217	313	1.695	1.150	800
Stahlmasse pro unbeladenen Behälter [Mg]	22,500	58,100	55,5	5,600	1,350	0,700	2,885	5,665	0,1275
Ges. Stahlmasse pro Materialgebiet [Mg]	1.1497	52.638	117.660	14.672	9.742,950	219,100	4.890,075	6.514,750	102
Oberfläche der Endlagerbeh. [m ²]	15	31	31	6,76	18,64	23,83	23,83	6,76	6,33

A.7 Biosphärenmodelle

A.7.1 Dosiskonversionsfaktoren zur Bewertung des Lösungstransports

Im Vorhaben VSG wurden im AP 4 Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ zu berechnende Indikatoren definiert. Diese Indikatoren basieren auf dem Radiotoxizitätsfluss aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Im Vorhaben VSG erfolgt die radiologische Gewichtung der verschiedenen Radionuklide zur Berechnung des Radiotoxizitätsflusses mit den Dosisfaktoren für Erwachsene nach /GSF 02/. Diese sind in Tab. A.17 angegeben.

Da die Dosiskonversionsfaktoren die jährliche Strahlenexposition quantifizieren, die sich bei einer bestimmten Radionuklidkonzentration im genutzten Wasser ergibt, ist für die Berechnung der Radiotoxizität aus Dimensionsgründen zweckmäßigerweise eine jährliche Wassermenge festzulegen, in der das frei gesetzte Radionuklidinventar als gelöst angenommen wird. Diese jährliche Wassermenge wird für 10 Personen auf $5.000 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ angesetzt.

Tab. A.17 Dosiskonversionsfaktoren (DKF) für die berücksichtigten Nuklide in $\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1} / \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ /GSF 02/

Spalt- und Aktivierungsprodukte		Th- und Np-Reihe		U- und Ac-Reihe	
Nuklid	DKF	Nuklid	DKF	Nuklid	DKF
C-14	$4,6 \cdot 10^{-8}$	Cm-248	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Cm-246	$8,0 \cdot 10^{-7}$
Cl-36	$3,5 \cdot 10^{-8}$	Pu-244	$3,0 \cdot 10^{-6}$	Pu-242	$9,4 \cdot 10^{-7}$
Ca-41	$2,0 \cdot 10^{-9}$	Pu-240	$9,6 \cdot 10^{-7}$	Am-242	$7,6 \cdot 10^{-7}$
Ni-59	$4,9 \cdot 10^{-9}$	U-236	$5,6 \cdot 10^{-7}$	U-238	$7,1 \cdot 10^{-7}$
Ni-63	$1,1 \cdot 10^{-9}$	Th-232	$1,1 \cdot 10^{-4}$	Pu-238	$7,5 \cdot 10^{-7}$
Se-79	$3,4 \cdot 10^{-7}$	U-232	$5,4 \cdot 10^{-6}$	U-234	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Rb-87	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Cm-245	$1,4 \cdot 10^{-6}$	Th-230	$3,7 \cdot 10^{-5}$
Sr-90	$1,8 \cdot 10^{-7}$	Am-241	$8,0 \cdot 10^{-7}$	Ra-226	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Zr-93	$3,7 \cdot 10^{-8}$	Np-237	$4,7 \cdot 10^{-6}$	Cm-247	$2,9 \cdot 10^{-6}$
Mo-93	$3,2 \cdot 10^{-7}$	U-233	$3,9 \cdot 10^{-6}$	Am-243	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Nb-94	$3,1 \cdot 10^{-6}$	Th-229	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Pu-239	$9,8 \cdot 10^{-7}$
Tc-99	$8,8 \cdot 10^{-9}$			U-235	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Pd-107	$1,9 \cdot 10^{-9}$			Pa-231	$4,0 \cdot 10^{-5}$

Tab. A.17 Dosiskonversionsfaktoren (DKF) für die berücksichtigten Nuklide in $\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ /GSF 02/ (Fortsetzung)

Spalt- und Aktivierungsprodukte		Th- und Np-Reihe		U- und Ac-Reihe	
Nuklid	DKF	Nuklid	DKF	Nuklid	DKF
Sn-126	$1,6\cdot 10^{-5}$			Ac-227	$1,0\cdot 10^{-5}$
I-129	$5,6\cdot 10^{-7}$				
Cs-135	$5,7\cdot 10^{-8}$				
Cs-137	$9,5\cdot 10^{-7}$				
Sm-151	$3,2\cdot 10^{-10}$				

A.8 Anhang zu Rechenfällen aus dem Referenz- und den Alternativszenarien (Kap. 5.2.1 und Kap. 5.2.2)

In diesem Anhang finden sich ergänzende Abbildungen zu Rechenfällen aus dem Referenz- und den Alternativszenarien (auf diese Abbildungen wird in Kap. 5.2.1 und Kap. 5.2.2 verwiesen).

In Abb. A.3 werden Ergebnisse der Rechenfälle P1 – P5 gezeigt. Diese Rechenfälle beinhalten die ursprünglich angenommenen 18 Kg Wasser in den POLLUX®-10-Behältern, und wurden der Vollständigkeit halber in diesen Bericht aufgenommen. Abb. A.5 dient dem Systemverständnis zum Gasfluss über den nördlichen Streckverschluss für die Einlagerungsvariante AB1. Abb. A.7 illustriert die C-14 Freisetzung über die unteren Schachtelemente (Basis: Aktivitätsströme durch das unterste Dicht element der beiden Schachtverschlüsse), welche nur für zwei Rechenfälle ermittelt wurde und in anderen Rechenfällen Null beträgt.

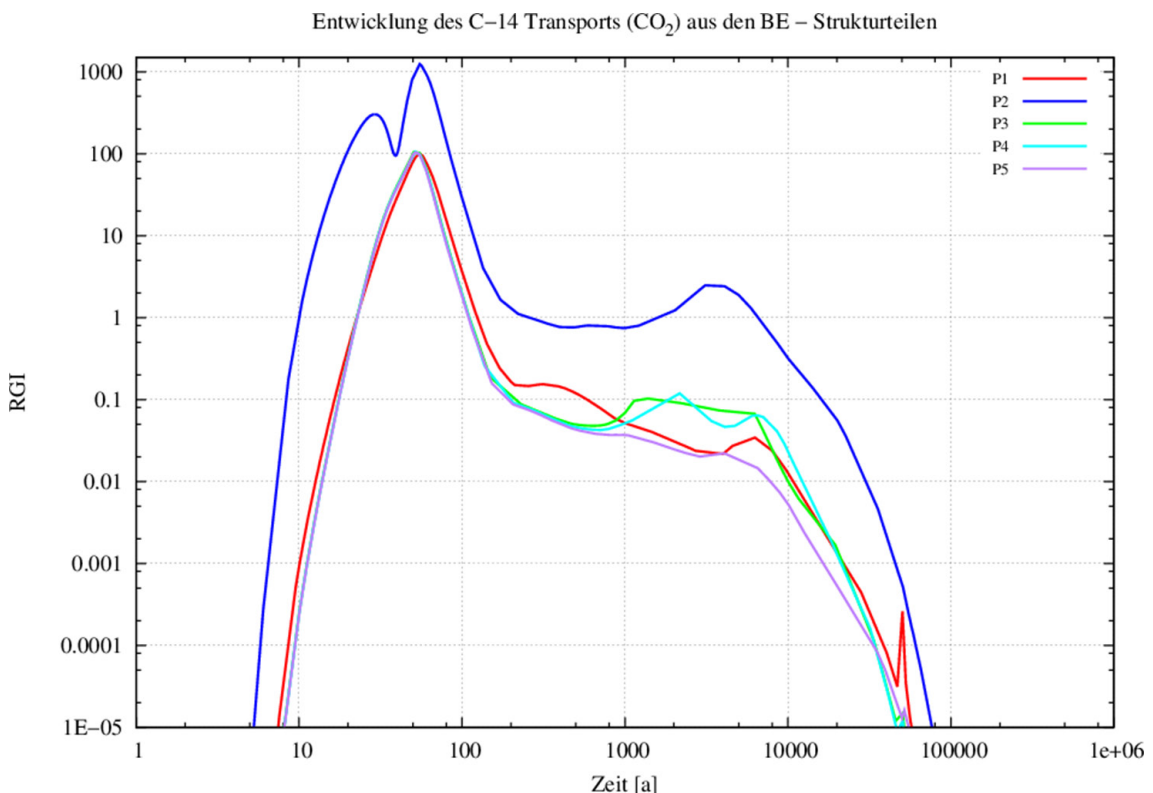


Abb. A.3 C-14 Freisetzung in den Infrastrukturbereich

Rechenfälle P1 – P5 (s. Tab. 4.21 und Tab. 5.3), Einlagerungsvariante B1, BE-Strukturteile

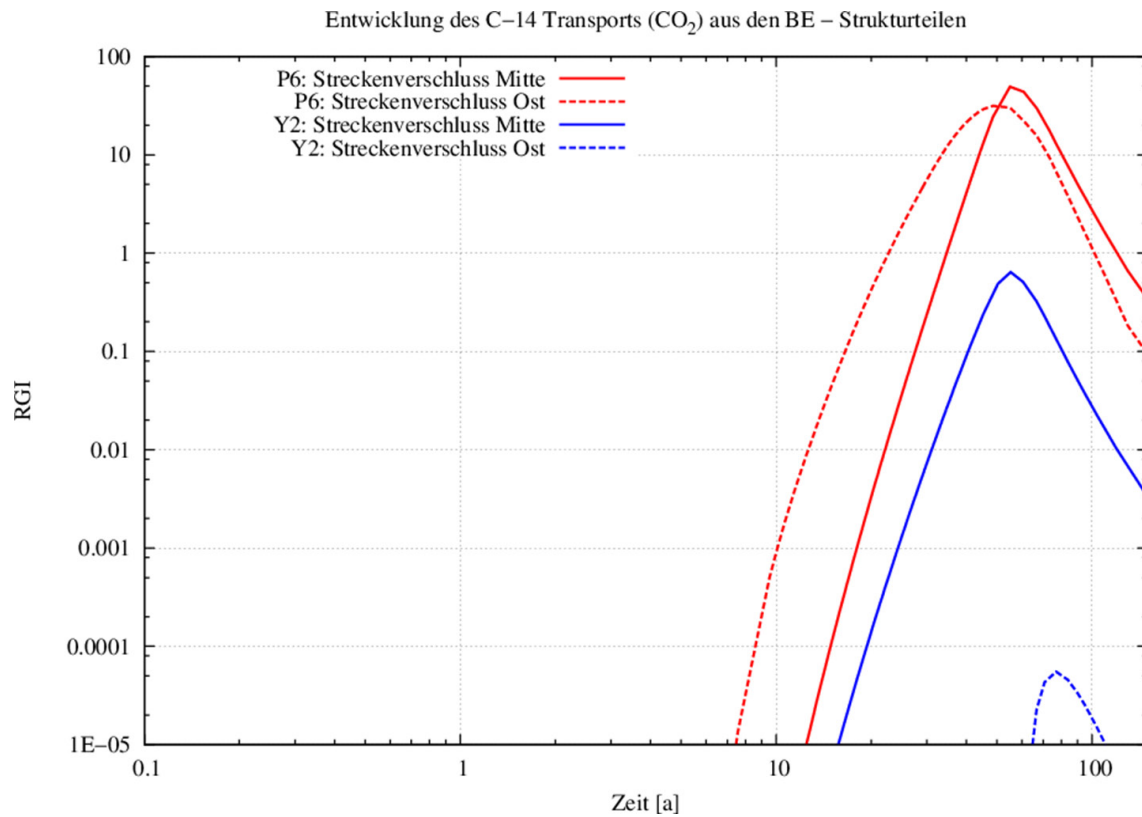


Abb. A.4 C-14 Freisetzung über die Streckenverschlüsse Ost und Mitte

Rechenfälle P6 und Y2 (s. Tab. 4.20 und Tab. 4.21), Einlagerungsvariante B1, BE-Strukturteile und defekte Brennelementbehälter; wesentlich ist hier der Größenordnungsunterschied der Freisetzung zwischen Streckenverschluss Ost und Mitte bezogen auf die beiden Rechenfälle

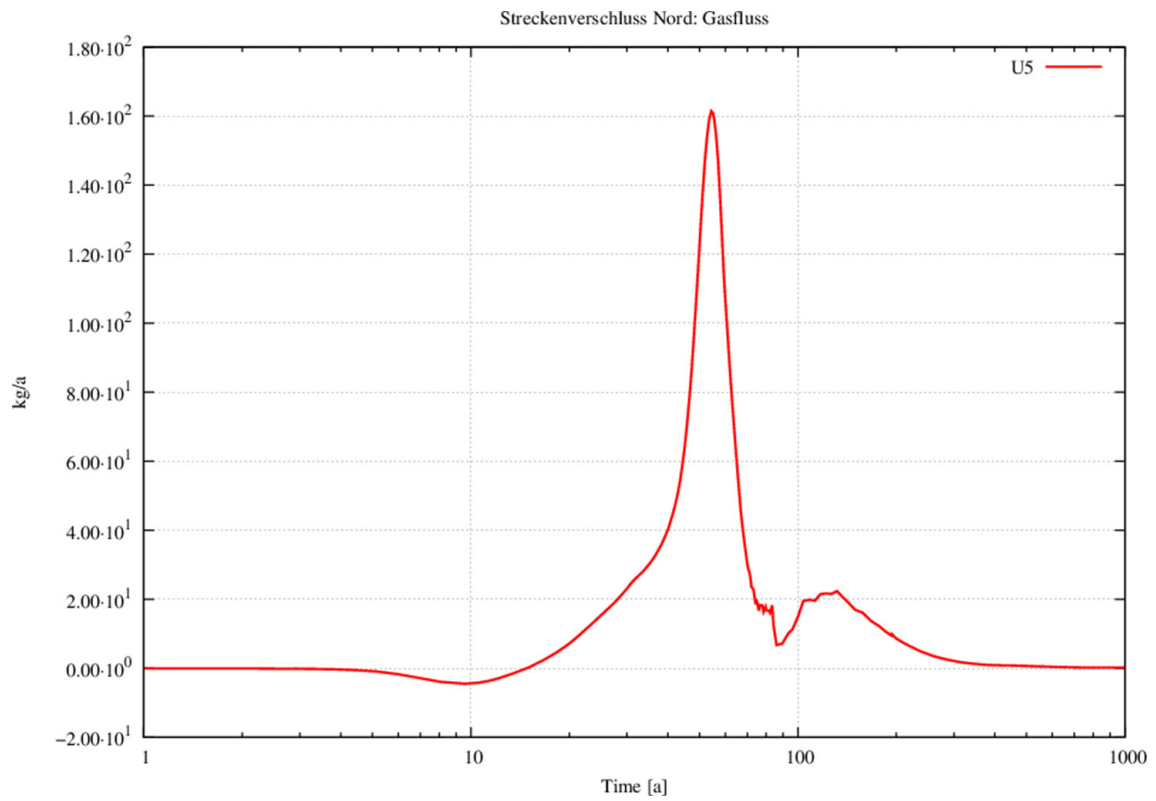


Abb. A.5 Gasfluss über den nördlichen Streckenverschluss

Einlagerungsvariante AB1, Rechenfall U5, Negative Werte zeigen Fluss vom Ostflügel in den Westflügel (bis ca. 10 Jahre), pos. Werte den umgekehrten Fluss

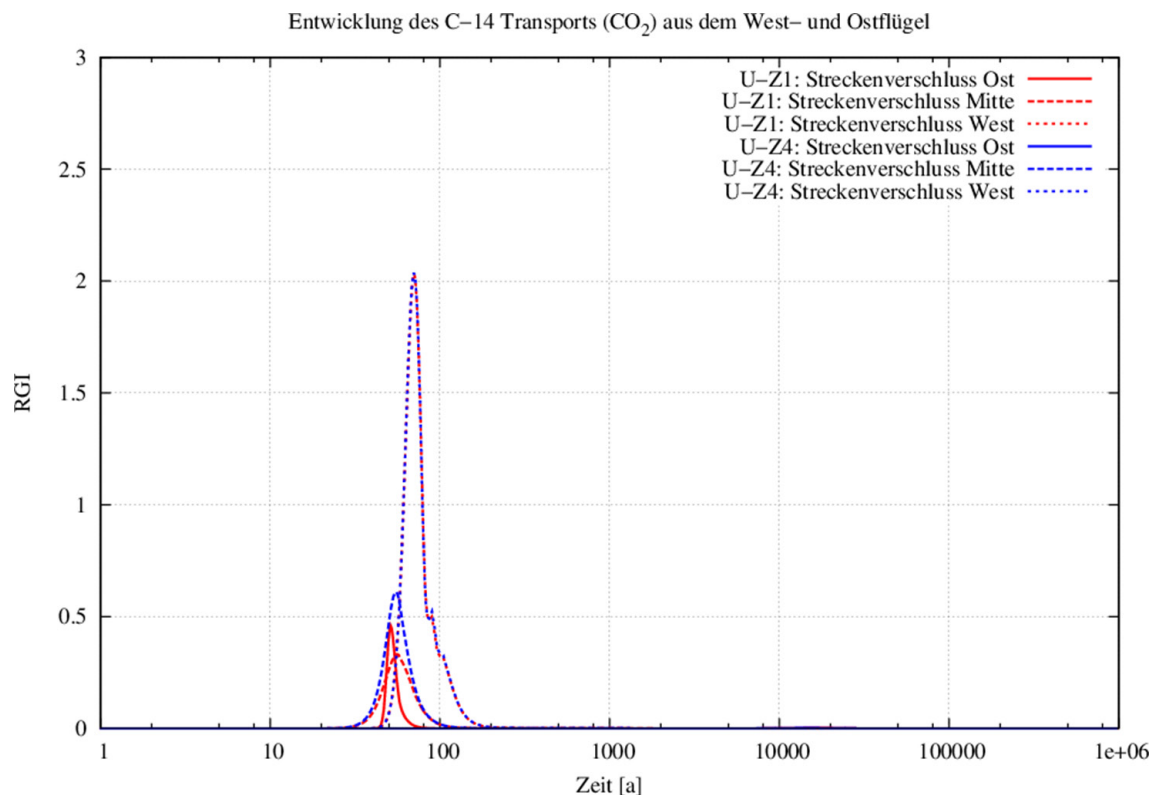


Abb. A.6 C-14 Freisetzung über verschiedene Streckenverschlüsse

Einlagerungsvariante AB1, Rechenfall U-Z1 und U-Z4, Gasfluss verläuft primär über den westlichen Streckenverschluss

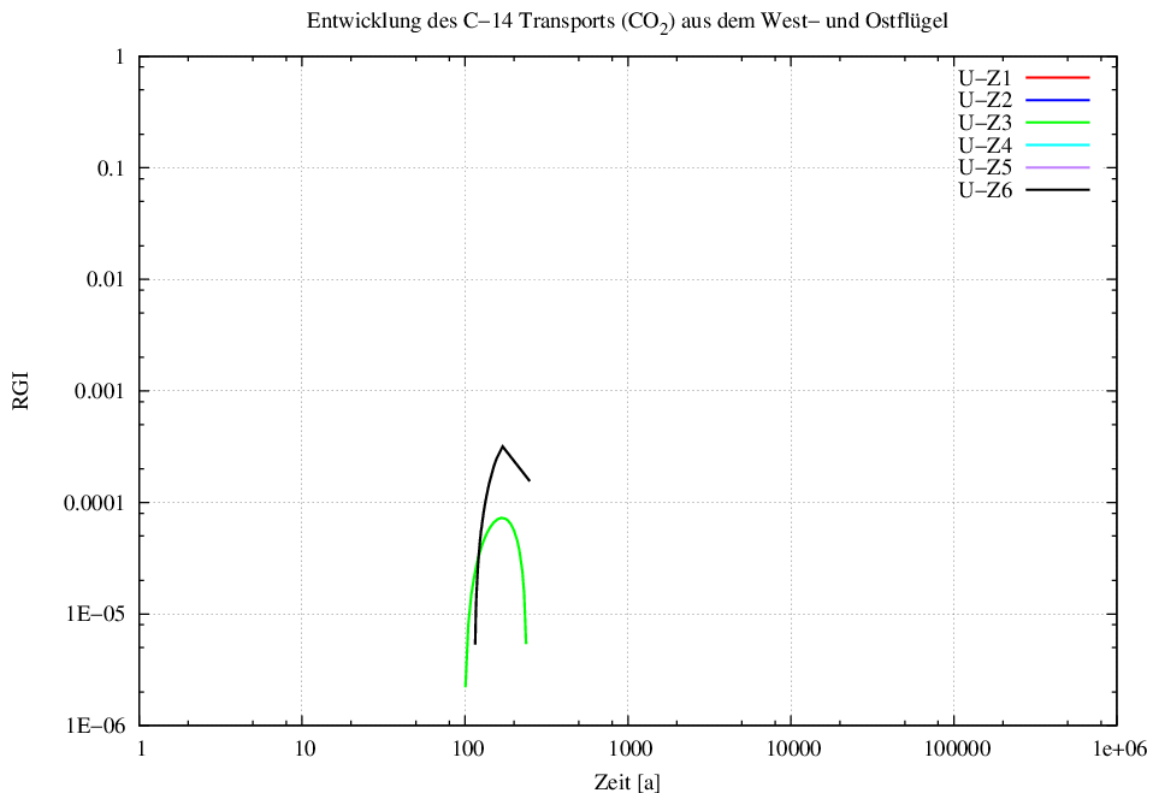


Abb. A.7 Berechneter RGI auf Basis der Aktivitätsströme durch die untersten Dichtelemente der Schachtverschlüsse (Summe aus Schacht 1 und 2)

Die Kurven wirken aufgrund der logarithmischen Darstellung „abgeschnitten“ und würden für die nicht dargestellten Bereiche in einer linearen Darstellung in den negativen Bereich fallen, was auf einen Fluidtransport in umgekehrte Richtung, also in das Endlager hinein, hinweist.

A.9 Forschungs- und Entwicklungsbedarf; Formblätter AP 14

A.9.1 Formblatt AP 10 – 01

Systematik der Ableitung von Rechenfällen für numerische Berechnungen aus Szenarien/FEP

Dieser Punkt wurde in /KOC 12/ bereits als Punkt AP 9.1 – 8 aufgenommen.

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Im VSG-Vorhaben werden aus den identifizierten FEP Szenarien und daraus nach „expert-judgement“ Rechenfälle abgeleitet. Derzeit fehlt eine Methodik, aus solchen Szenarien Rechenfälle abzuleiten, die für das Szenarium abdeckend sind. Eine weitere Herausforderung ist es, die Zahl der Rechenfälle auf ein praktikables Maß zu begrenzen. Bei der in der VSG verwendeten Methode der Szenarientwicklung ist die Zulässigkeit und auch die Anwendbarkeit (insbesondere von Sensitivitätsanalysen) auf Modelle, wie sie in der VSG verwendet wurden, zu prüfen, da diese sich deutlich von den in anderen Ländern verwendeten unterscheiden.

Vorhandener Kenntnisstand

Im Vorhaben wurden aus den identifizierten FEP Szenarien abgeleitet. Die Entwicklung bzw. Abstraktion von Rechenfällen aus den Szenarien erfolgte nach „expert-judgement“ über ein in der VSG entwickeltes Schema zur Erstellung von Storyboards zielgerichtet in Bezug zu den Möglichkeiten der Rechenprogramme.

Begründung für die Notwendigkeit

Aufbauend auf die Methodik einer Szenarienermittlung ist eine Methode zur Herleitung von Rechenfällen in den Langzeitsicherheitsanalysen zu entwickeln. Das Zusammenspiel von probabilistischen Methoden und der in der VSG verwendeten Methode der Szenarientwicklung und die Angabe von Wahrscheinlichkeitsdichten zu wahrscheinlichen bzw. weniger wahrscheinlichen FEP-Ausprägungen sind noch Gegenstand der Diskussion und sind durch zukünftige F&E-Arbeiten zu untersuchen.

Anmerkungen

Auf eine probabilistische Vorgehensweise wurde in der VSG bewusst verzichtet, weil einerseits durch die Vorgabe von wahrscheinlichen bzw. weniger wahrscheinlichen Entwicklungen bzw. Ausprägungen im FEP-Katalog auf die Angabe von Wahrscheinlichkeitsdichten verzichtet wurde und andererseits deterministische Unsicherheitsbetrachtungen die Notwendigkeit von probabilistischen Analysen nicht anzeigten.

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

Siehe BMWi-Programm und IGD-TP.

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

A.9.2 Formblatt AP 10 – 02

Systematische Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften von Salzgrusversatz

Dieser Punkt wurde in /KOC 12/ bereits im Punkt AP 9.1 – 5 mit angesprochen.

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Die hydraulischen Parameter des Salzgrus-Versatzes, insbesondere bei kleinen Porositäten, sind derzeit nur mit großen Ungewissheiten oder gar nicht bekannt. Die Mobilität der mit dem Salzgrusversatz eingebrachten Feuchte (im Bereich von 1 Gew.-% und kleiner) ist weitgehend nicht untersucht. Es wird eine geringe Mobilität vermutet, es fehlt hierfür jedoch ein entsprechender Nachweis. Die Relevanz dieser Prozesse besteht in der langfristigen Einschlusswirksamkeit des Salzgruses. In hydrodynamischen Modellen wird das hydraulische Verhalten des Salzgruses bei kleinen Versatzporositäten zurzeit vereinfacht und in konservativer Weise durch Extrapolation abgeleitet. Weiterhin sind Porositäts- und Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit von der Versatzkompaktion zwar vorhanden, aber teilweise nicht miteinander vergleichbar. Für die

hydraulische Entwicklung über lange Zeiträume sind die hydraulischen Zustände bei kleinen Porositäten relevant, auch wenn sie auf laborativen Zeitskalen zu vernachlässigbaren Flüssen führen.

Die Integrale Permeabilität in Salzgrus-versetzten Strecken, die der Gebirgskonvergenz unterliegen, wird neben den Eigenschaften des Versatzes von der EDZ bestimmt und ist derzeit noch nicht ausreichend quantifizierbar. Dies liegt

- an der Inhomogenität der Versatzkompaktion,
- an der derzeit ungenügend bekannten Permeabilitätsentwicklung der sich schließenden EDZ,
- am fehlenden Prozessverständnis für Versatzporositäten im Bereich um 1 % und kleiner (u. a. hinsichtlich der Konnektivität kleiner Porenräume),
- an der ungenügenden Kenntnis der Mobilität von Fluiden in hochkompaktiertem Salzgrus (< 1 % Porosität) und ihre Auswirkungen auf Diffusion und Advektion.

Vorhandener Kenntnisstand

In den Einlagerungsbereichen ist mit einem sehr geringen initialen Wassergehalt zu rechnen (im Bereich von 1 Gew.-% und kleiner). Es liegen nur wenige Informationen und Versuche vor, die eine Quantifizierung bzgl. der Durchlässigkeit und die weitere Kompaktion bei kleinen Porositäten, d. h. voneinander abhängigen Eigenschaften, zulassen. So ist der Kenntnisstand zum Versatzverhalten bei geringen Porositäten und bei geringer zusätzlich vorhandener Feuchte (z. B. im Versatz vorhandene Wetterfeuchte oder in Folge kleiner zutretender Lösungsmengen) gering.

Begründung für die Notwendigkeit

Nicht abschließend geklärt ist, ob die mit dem Versatz eingebrachte Feuchte im Zuge der Versatzkonvergenz dem durchströmbaren Porenraum entzogen wird oder nicht. Geklärt werden muss die Mobilität der eingebrachten, geringen Feuchte und welche Modelle geeignet sind, den Transport geringer Wassergehalte zu beschreiben, da diese Korrosionsprozesse zur Verfügung stehen könnten. F&E-Bedarf besteht in Bezug u. a. hinsichtlich der effektiven Diffusion bei kleinen Porositäten. Es sollte eine Erweiterung der Datenbasis zur Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung von Salzgrus unter mechanischer Belastung (Kompaktionsverhalten) durchgeführt werden.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

standortunabhängig

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

Gezielte Untersuchungen zu den Aspekten sind nicht bekannt teilweise zu bestimmten Einzelfragen. Zu Diffusivitäten bei kleinen Porositäten besteht eine Wechselwirkung mit den Untersuchungen im Projekt DIKOSA, zu den Permeabilitäten bei kleinen Porositäten im Projekt REPOPERM II

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Forschung

A.9.3 Formblatt AP 10 – 03

Systematische Ermittlung von Zweiphasenflussparametern zum Salzgrusversatz

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Die Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke sind für Salzgrus weitgehend unbekannt, jedoch von großer Bedeutung für die hydraulische Entwicklung und den Stofftransport im Endlager. Von den Zweiphasenfluss-Eigenschaften hängen u. a. auch Gaseindringdrücke ab. In Bezug auf diese ist zu klären, ob es sich um scharfe Druckschwellwerte handelt oder nicht. Die Abhängigkeit der Kapillardruckkurven von der unter Endlagerbedingungen sich verändernden Porosität ist unbekannt. Insbesondere für kleine Porositäten stellt sich die Frage, mit welchen Diffusionskoeffizienten, absoluten und relativen Permeabilitäten sowie Kapillardrücken die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus beschrieben werden können, oder ob grundsätzlich ein von der klassischen Zweiphasenfluss-Theorie abweichendes Modell gewählt werden muss. Für die hydraulische Entwicklung über lange Zeiträume sind die hydraulischen Zustände bei kleinen Porositäten relevant, auch wenn sie auf laborativen Zeitskalen zu vernachlässigbaren Flüssen führen.

Vorhandener Kenntnisstand

Es liegen nur wenige Informationen und Versuche vor, die eine Quantifizierung bzgl. der Zweiphasenfluss- Eigenschaften, zulassen. So ist der Kenntnisstand zum Versatzverhalten bei geringen Porositäten und bei geringer zusätzlich vorhandener Feuchte (z. B. im Versatz vorhandene Wetterfeuchte oder in Folge kleiner zutretender Lösungsmengen) gering. Bezüglich der 2-Phasenfluss- und der Diffusionseigenschaften von Salzgrusversatz besteht daher erheblicher Forschungsbedarf, da hier nahezu keine experimentellen Untersuchungen vorliegen.

Begründung für die Notwendigkeit

Die Relevanz dieser Prozesse besteht in der langfristigen Einschlusswirksamkeit des Salzgruses. In hydrodynamischen Modellen wird das hydraulische Verhalten des Salzgruses bei kleinen Versatzporositäten zurzeit vereinfacht und in konservativer Weise durch Extrapolation abgeleitet. Die Ursachen unterschiedlicher Einphasenpermeabilitäten für verschiedene Fluide sind zu klären.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

standortunabhängig

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

Gezielte Untersuchungen zu den Aspekten sind nicht bekannt oder existieren teilweise zu bestimmten Einzelfragen. Auf dieses Thema wird eventuell bei einer Erweiterung des Vorhabens REPOPERM II eingegangen.

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Forschung

A.9.4 Formblatt AP 10 – 04

Ermittlung hydraulischer und geochemischer Eigenschaften der Kontaktzonen zwischen Steinsalzkontur und Dichtelementen (Salzbeton, Sorelbeton, Bentonit) sowie Prüfung genutzter Modellierungskonzepte

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Baustoffen sind i. d. R. in Bezug auf ihre hydraulischen Eigenschaften gegenüber den Baustoffen selbst verändert. Deshalb ist es gemäß technischem Regelwerk unzulässig, die Eigenschaften der Baustoffe für die Kontaktzonen anzusetzen. Aufgrund der langen Nachweiszeiträume sind auch geochemische Einflüsse in Folge reaktiven Transports, die zu lokalisierten Veränderungen führen, einzubeziehen. Ein systematisches, im Labor realisierbares Versuchskonzept zur reproduzierbaren Ermittlung solcher Eigenschaften existiert nicht.

Vorhandener Kenntnisstand

Derzeit wird bzgl. der hydraulischen Eigenschaften auf wenige In-situ-Messungen zurückgegriffen. Bzgl. eines möglicherweise lokalisierten Korrosionsfortschrittes existieren keine experimentellen Ergebnisse, es wird auf Expertenschätzungen bzw. Berechnungsergebnisse zurückgegriffen.

Begründung für die Notwendigkeit

Der Einfluss wird zurzeit als gering eingeschätzt, was aber für spätere Genehmigungsverfahren zu belegen ist. Entsprechend dem Stand der Versuchskonzepte sind auch genutzte Modellierungskonzepte wenig belegt und zu überprüfen.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

standortunabhängig.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

Teile der hier angesprochenen Themen sollen in den geplanten Vorhaben LAVA, LASA und ELSA behandelt werden.

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Forschung

A.9.5 Formblatt AP 10 – 05

Hydraulische Eigenschaften von Salzgrus-versetzten Strecken und Streckenverschlüssen und die zeitliche Entwicklung ihre integralen Transporteigenschaften von Streckenverschlüssen mit Auflockerungszone (standortunabhängig)

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Das Verhalten von Grenzflächen zwischen den verschiedenen Materialien im Endlager (Verschlüsse, Behälter, usw.) ist für den Gas- und Flüssigkeitstransport relevant. Das Verhalten von Grenzflächen in Hinblick auf Strömung und Stofftransport wurde bislang wenig untersucht. Die integrale Permeabilität in Salzgrus-versetzten Strecken, die der Gebirgskonvergenz unterliegen, wird durch die Eigenschaften des Versatzes und der EDZ bestimmt und ist derzeit noch nicht ausreichend quantifizierbar.

Vorhandener Kenntnisstand

Die hydraulischen Eigenschaften der Streckenverschlüsse werden von dem Verhalten des Dammmaterials, der Auflockerungszone und der Kontaktzonen bestimmt. In Sicherheitsanalysen werden die Dammeigenschaften oft homogenisiert betrachtet. Zu klären ist, wie eine angemessene Homogenisierung und Beschreibung anhand der Zweiphasenfluss-Theorie möglich ist.

Begründung für die Notwendigkeit

Nach wie vor ist das Verständnis folgender Prozesse unzureichend:

- Kompaktiert Salzgrusversatz und die EDZ um Streckenverschlüsse im Endlager homogen oder kann es zu Kanalisierungseffekten kommen?

- Die strömungs- und transportrelevanten Eigenschaften von Salzgrus in Abhängigkeit von der Porositätsentwicklung sind vor allem für kleine Porositäten unbekannt. Wichtig ist die Konnektivität der Porenräume bei Porositäten im Prozentbereich und kleiner.
- Die Permeabilitätsentwicklung der sich schließenden EDZ ist unbekannt.

Hierbei spielen folgende Punkte eine Rolle:

- Welche Elemente der Streckenverschlüsse (inklusive Kontaktfläche und Auflockerungszone) sind hydraulisch aktiv und bestimmen Permeabilitäten, Kapillardrücke, Porosität und die Menge des mobilen Porenwassers?
- Existiert eine absolute Permeabilität, die unabhängig von den durchströmenden Phasen ist? Experimentelle Untersuchungen zeigen oft abweichende Permeabilitäten für die Gas- und Flüssigkeitsphase, die sich im Rahmen der Zweiphasenfluss-Theorie aber nur schlecht einordnen lassen, weil u. a. die Sättigungszustände unbekannt sind.

Wieviel des initial enthaltenen Wassers in den Dämmen ist mobil? Mobiles Wasser kann je nach Endlagerkonzept in Salzgrusbereiche gelangen und dort zu höheren Sättigungen, Kompaktionsgeschwindigkeiten und Gasdrücken führen.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

standortunabhängig.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

u. a. REPOPERM II

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Forschung

A.9.6 Formblatt AP 10 – 06

Auswirkungen der Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Der Anteil der zu betrachtenden Kohlenwasserstoffmengen und ihre Auswirkungen auf das Korrosionsverhalten der Behälter, auf das geochemische Milieu und auf das gebirgsmechanische Verhalten konnte für die VSG bisher nur konservativ abgeschätzt werden.

Vorhandener Kenntnisstand

In-situ Messungen der Kohlenwasserstoffmenge sowie in diesem Bericht bereits referenzierter Kenntnisstand: /BRA 12/, /WEB 11/.

Begründung für die Notwendigkeit

Es besteht Forschungsbedarf zum Verhalten der Kohlenwasserstoffe bei Abfalleinlagerung bzw. Erhitzung bzw. zum Migrationsverhalten bei Druckentlastung und zu den chemischen Prozessen im Salzgestein (z. B. thermochemische Sulfatreduktion).

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

standortunabhängig

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

Es besteht Forschungsbedarf zum Verhalten der Kohlenwasserstoffe bei Abfalleinlagerung bzw. Erhitzung bzw. zum Migrationsverhalten bei Druckentlastung und zu den chemischen Prozessen im Salzgestein (z. B. thermochemische Sulfatreduktion)

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Forschung

A.9.7 Formblatt AP 10 – 07

Weiterentwicklung hydraulischer Berechnungsmethoden unter Berücksichtigung des Zweiphasen-Flusses zur Bewertung der Langzeitsicherheit

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Zurzeit existieren Berechnungsmethoden zum Zweiphasenfluss auf Prozesslevel; diese können aufgrund der räumlichen Diskretisierung nur Teilaspekte eines Endlagersystems abbilden. Mit diesen Programmen lässt sich nur sehr vereinfacht der mögliche Radionuklidtransport im Endlager berechnen. Weiter entwickelte Berechnungsmethoden zum Radionuklidtransport im gesamten Grubengebäude können dagegen den Zweiphasenfluss inkl. Konvergenz, Korrosion, Wasserverbrauch und einer großen Anzahl von Radionuklidzerfallsketten nicht berücksichtigen. Die gemeinsame Berücksichtigung von Zweiphasenfluss, Radionuklidtransport, Korrosion, Konvergenz, etc. in einem Rechenprogramm sowie die Relevanz, die diese Phänomene für das Endlagersystem haben, machen eine Weiterentwicklung heutiger Berechnungsmethoden notwendig.

Vorhandener Kenntnisstand

Zurzeit werden in Zweiphasenfluss-Berechnungen nur wenige Radionuklide, z. B: im Rechenprogramm TOUGH2 nur 2, berücksichtigt. In diesem Vorhaben wurden erstmals die Prozesse Zweiphasenfluss, Korrosion, Versatzkompaktion und Gastransport für ein gesamtes Endlagersystem gemeinsam betrachtet.

Begründung für die Notwendigkeit

Die gemeinsame Berücksichtigung von 2-Phasenfluss und Radionuklidtransport in einem Rechenprogramm sowie die Relevanz, die die beiden Phänomene für das Endlagersystem im Sicherheitsnachweis haben, machen eine Weiterentwicklung heutiger Berechnungsmethoden notwendig.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

nicht bekannt

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Entwicklungsarbeit.

A.9.8 Formblatt AP 10 – 08

Komplexe Transportvorgänge im Endlager (u. a. Transport von Wasserdampf)

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Die Entwicklung der Zustände im Endlager kann derzeit nur mit vereinfachten Prozessbetrachtungen untersucht werden. Aspekte wie der Transport von Wasserdampf und dessen Einfluss auf die Porositätsentwicklung aufgrund von Salzlösung (und ggf. Salzausfällung an anderer Stelle) können derzeit auf der Endlagerskala nicht betrachtet werden.

Vorhandener Kenntnisstand

Vereinfachte Prozessbetrachtungen

Begründung für die Notwendigkeit

Das Verhalten von Wasserdampf und dessen Einfluss auf die Porositätsentwicklung im Endlager ist für den Gas- und Flüssigkeitstransport relevant.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

nicht bekannt

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Forschungsarbeit.

A.9.9 Formblatt AP 10 – 09

Verbesserung der Beschreibung der Mobilität von Fluiden in Sorelbeton und anderen Betonen z. B. aus der Konditionierung oder Behälter

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Der Anteil der mobilen Fluide (Wasser) in nicht lösungsgesättigten Betonen und in konditionierten Abfällen bzw. deren Behälter (Beton) ist gering gegenüber dem Anteil an gebundenem Wasser. Dennoch können diese Anteile neben dem Zutritt von Lösungen zusätzlich für Korrosionsprozesse zur Verfügung stehen. Die Porosität und die damit verbundene Permeabilität des Betons bzw. des Korrosionsprodukts und die Mobilität von Lösungen in den Behältern werden durch Auflösungen und Ausfällungen verändert. Eine Abbildung dieser Zusammenhänge in sicherheitstechnischen Modellrechnungen ist noch nicht erfolgt.

Vorhandener Kenntnisstand

Es sind keine gesicherten Daten vorhanden. In diesem Vorhaben wurden Abschätzungen vorgenommen.

Begründung für die Notwendigkeit

Die Verbesserung der Beschreibung der Mobilität von Fluiden in Sorelbeton erlaubt eine Aussage über die Wirksamkeit und Lebensdauer von Verschlussbauwerken und Abfallbehältern und der möglichen Freisetzung von Wässern aus diesen Behältern.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

Im Rahmen der VSG wurde die Korrosionsstabilität von Betonen der Schacht- und Streckenverschlüsse gegenüber Salzlösungen untersucht.

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Forschungsarbeit.

A.9.10 Formblatt AP 10 – 10

Verbesserung der Beschreibung von Temperaturabhängigkeiten von chemischen Prozessen im Endlager

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Die Freisetzung und Löslichkeit von Radionukliden sind überwiegend bei Raumtemperatur bestimmt worden. Dies gilt gleichermaßen für Sorption- und Redoxprozesse. Die Bestimmung von Löslichkeiten ist unvollständig. Die Korrosion von Strukturteilen und deren Radionuklidfreisetzung ist lückenhaft untersucht.

Der temperaturabhängige Henry-Koeffizient beschreibt im Henry Gesetz das Verhältnis zwischen dem Partialdruck des Gases und der flüssigen Phase. Die Dissoziation von CO₂ mit Wasser wurde in der VSG nicht betrachtet. Sie ist wie der physikalische Henry-Koeffizient temperaturabhängig für den Rückhalt von z. B. volatilem C-14 verantwortlich.

Vorhandener Kenntnisstand

Es wurden Reaktionen nur bei Raumtemperatur (25 °C) untersucht.

Diesem Effekt der Unterschätzung der Dissoziation von CO₂ mit Wasser wird in den Modellen dadurch entgegengewirkt, dass die gesamte volatile IRF instantan und vollständig in den Porenraum der Einlagerungsstrecke des Modells freigesetzt wird, so dass in den Modellen insgesamt eine deutliche Überschätzung der freigesetzten C-14 Menge stattfindet.

Begründung für die Notwendigkeit

Die verbesserte Quelltermbeschreibung führt zum Abbau von Ungewissheiten in der radiologischen Konsequenzenanalyse.

Mit steigender Temperatur sinken die Löslichkeit der Gasphase in der Flüssigphase und damit auch die Löslichkeit des volatilen Radionuklids bzw. seiner Verbindung in der Flüssigphase. Das heißt, dass z. B. die Konzentration von CO₂ und damit auch von C-14 in der flüssigen Phase in einem warmen Gebiet (z. B. direkt neben den Behältern) überschätzt und damit das volatile C-14 in der Gasphase unterschätzt wird. Die Bewegung von gasförmigen CO₂ in kältere Gebiete (z. B. Richtstrecken, Querschläge) führt zu einem Übertritt des gasförmigen CO₂ in die flüssige Phase.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

nicht bekannt

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Forschungsarbeit.

A.9.11 Formblatt AP 10 – 11

Mechanistische Beschreibung des Übergangs von der radiolytisch dominierten zur thermodynamisch kontrollierten Auflösung der Matrix

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Der Übergang von der radiolytisch dominierten Auflösung der Brennstoffmatrix zu einer thermodynamischen Beschreibung der Auflösung überstreicht einen langen Zeitraum, der bisher nur ungenau modelltechnisch beschrieben werden kann.

Vorhandener Kenntnisstand

Konservative Abschätzungen vorhanden.

Begründung für die Notwendigkeit

Die Notwendigkeit ist dadurch gegeben, da bisher nur abdeckende Abschätzungen für eine Quelltermbeschreibung gemacht werden und Konservativitäten abgebaut werden können.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

nein

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Forschungsarbeit.

A.9.12 Formblatt AP 10 – 12

Abbildung und Weiterentwicklung der modelltechnischen Wiedergabe des Quellterms in der Langzeitsicherheits- und Konsequenzenanalyse

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Die unterschiedlichen Abfallbestandteile und Randbedingungen für die Auflösung, Freisetzung und Löslichkeit von Radionukliden werden modelltechnisch abdeckend berücksichtigt. Dies führt zu Überschätzungen.

Die Menge der IRF für alle Abfallarten, vor allem der volatile Anteil, beruhen auf Modellvorstellungen und Abschätzungen und ist insbesondere für die Abfälle im Westflügel nicht bekannt. In den Analysen der VSG wurde dies durch Modellannahmen abdeckend berücksichtigt.

Vorhandener Kenntnisstand

Quellterm einzelner Komponenten bekannt.

Begründung für die Notwendigkeit

Die Verbesserung der modelltechnischen Abbildung des Quellterms verringert Ungewissheiten.

Eine eventuell im Abfall vorhandene IRF muss berücksichtigt werden. Die Ungewissheit über die volatile Freisetzung z. B. des C-14 und I-129 aus den Behältern manifestiert sich in der Annahme einer instantanen und vollständigen Freisetzung des IRF-Anteils trotz des geringen Lösungsdargebots. Beim volatilen C-14 wird aufgrund der Ungewissheit der detaillierten Prozessabläufe konservativ angenommen, dass das entstandene CO₂-Gas den volatilen IRF-Anteil an C-14 vollständig enthält und mit der Gasphase transportiert wird.

Anmerkungen

Eine weitere Modellvorstellung der C-14-Freisetzung, die als nach derzeitigem Kenntnisstand in der VSG als nicht wahrscheinlich einzustufen wurde, kann wie folgt beschrieben werden: Die auf der Oberfläche der Hüllrohre sorbierten und aus der Oxid-

schicht stammenden oxidischen Verbindungen mit C-14 könnten unter reduzierenden Verhältnissen vollständig zu Methan ($^{14}\text{CH}_4$) weiter reagieren. Diese liegen dann in der Folge auch vollständig in der Gasphase vor. Nach gegenwärtiger Einschätzung ist diese Reduktion zu Methan jedoch unter Zwischen- und Endlagerbedingungen kinetisch stark gehemmt und im Rahmen von F&E zu untersuchen.

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

nein

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Forschungsarbeit.

A.9.13 Formblatt AP 10 – 13

Optimierung der Endlagerauslegung in Hinblick auf Freisetzungs-, Strömungs- und Transportprozesse

Spezifizierung des F&E-Bedarfs

Unsicherheiten bestehen in Bezug auf die Permeabilität Salzgrus-versetzter Strecken bei kleinen Porositäten, die Mobilität der in diese eingebrachte Feuchte, das Kompaktionsverhalten von Salzgrus und die Zweiphasenflussparameter von Salzgrus und Sorbeton. Neben der weiteren Forschung zur Reduzierung dieser Unsicherheiten erscheint es sinnvoll, das Sicherheitskonzept und die Endlager dahingehend zu optimieren, dass die erwähnten Unsicherheiten nicht sensitiv werden.

Endlagerauslegung

Wichtig ist die Erzielung eines einfachen Systems. Hierzu ist es z. B. erforderlich, die Gasdrücke unterhalb kritischer Werte für die Gesteinsdilatanz zu halten. Vor diesem Hintergrund sollte die Möglichkeit von Gasspeicherräumen im Endlager geprüft werden. Solche Räume begrenzen die Gasdrücke im Endlager, senken den Druckgradienten.

ten aus dem Endlager heraus und stellen Speicherräume für die Verzögerung des Gas- und Schadstofftransports zur Verfügung.

Behältereigenschaften

Die Behälter sind Teil des hydraulischen Systems. Unbekannt sind Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung der Behälter, wenn diese ihre Integrität verlieren.

Wichtig ist die Erzielung eines einfachen Systems. Hierzu ist es z. B. erforderlich, die Gasdrücke unterhalb kritischer Werte für die Gebirgsdilatanz zu halten. Vor diesem Hintergrund sollte die Möglichkeit von Gasspeicherräumen im Endlager geprüft werden. Solche Räume begrenzen die Gasdrücke im Endlager, senken den Druckgradienten aus dem Endlager heraus und stellen Speicherräume für die Verzögerung des Gas- und Schadstofftransports zur Verfügung.

Vorhandener Kenntnisstand

nicht vorhanden

Begründung für die Notwendigkeit

Endlagerauslegung

Es erscheint sinnvoll, das Sicherheitskonzept und die Endlagerauslegung dahingehend zu optimieren, dass Unsicherheiten oder Kenntnislücken zum Beispiel bezüglich des Verhaltens von Salzgrusversatz bei kleinen Porositäten oder bezüglich der Infiltration von Gas ins ungestörte Gebirge nicht sensitiv werden. Bei der Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen für saline Endlager wurden Zweiphasenfluss-Prozesse in der Vergangenheit kaum betrachtet. Diese liefern jedoch wertvolle Hinweise auf mögliche Optimierungen.

Behältereigenschaften

Behälter können als Porenraum, also als Gasspeicherraum zur Verfügung stehen, gleichzeitig korrodieren sie und verlieren möglicherweise ihre Integrität, so dass Radionuklide freigesetzt werden können. Der Gasspeicherraum ist ein möglicher sicherheitsrelevanter Aspekt, der derzeit modellmäßig nur abgeschätzt werden kann.

Anmerkungen

keine

Übertragbarkeit auf andere Standorte/standortunabhängig

Ist grundsätzlich zu lösen, unabhängig vom Standort und Wirtsgestein.

Existiert ein Forschungsprogramm dazu

nein

Ist das Thema eher Forschung oder eher Entwicklung

Es handelt sich im Wesentlichen um Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

**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

ISBN 978-3-939355-65-6