

Integrität geotechnischer Barrieren

Teil 1 Vorbemessung

Bericht zum Arbeitspaket 9.2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Erstellt von:

DBE-TEC
DBE TECHNOLOGY GmbH

The logo for GRS, consisting of the letters 'G', 'R', and 'S' in a stylized, rounded font. The 'G' and 'R' are connected, and the 'S' is separate.

Integrität geotechnischer Barrieren

Teil 1 Vorbemessung

Bericht zum Arbeitspaket 9.2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Nina Müller-Hoeppe (DBETEC)
Dieter Buhmann (GRS)
Oliver Czaikowski (GRS)
Hans-Joachim Engelhardt (DBETEC)
Horst-Jürgen Herbert (GRS)
Christian Lerch (DBETEC)
Michael Linkamp (DBETEC)
Klaus Wiczorek (GRS)
Mingliang Xie (GRS)

Juli 2012

Anmerkung:

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

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

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

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

Deskriptoren:

Chemische Vorbemessung, Gorleben, Hydraulische Vorbemessung, Mechanische Vorbemessung, Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung / Aufgabenstellung	1
2	Grundlagen für den Entwurf des Verschlusssystems	5
2.1	Standortspezifische Randbedingungen.....	5
2.1.1	Endlagerspezifische Randbedingungen und Stilllegungskonzept.....	5
2.1.2	Geologische Randbedingungen.....	8
2.1.3	Hydrogeologische Randbedingungen	14
2.1.4	Ausbau von Schächten und Zugangsstrecken	16
2.1.4.1	Schächte	16
2.1.4.2	Zugangsstrecken	19
2.2	Entwurfsannahmen für das Verschlusskonzept	20
2.2.1	Übergeordnete Anforderungen	20
2.2.2	Betrachtungszeitraum für die Funktionsfähigkeit.....	22
2.2.3	Sonstige Vorgaben für den Entwurf	23
2.3	Technische Entwurfsgrundlagen und Bewertung der Herstellbarkeit.....	24
3	Entwurf des Verschlusskonzeptes	33
3.1	Schachtverschluss.....	34
3.2	Streckenverschlüsse.....	43
3.3	Dichtpfropfen	45
4	Bautechnische Auslegung des Verschlusssystems – technischer Funktionsnachweis	49
4.1	Methodische Grundlagen.....	49
4.2	Einwirkungen	52
4.3	Strukturierung der FEP für den technischen Funktionsnachweis	54
4.4	Spezifizierung der Widerstände für den technischen Funktionsnachweis	61

5	Salzgruskompaktion.....	65
6	Berücksichtigung langer Funktionszeitdauern der Verschlüsse	71
7	Vorbemessung der Verschlüsse	77
7.1	Geochemische Vorbemessung des Verschlusssystems	78
7.1.1	Auslegungsbestimmende Deckgebirgswässer	78
7.1.2	Vorgehensweise bei der geochemischen Vorbemessung	81
7.1.3	Chemische Zusammensetzung der Ausgangslösungen und -feststoffe ...	83
7.1.4	Theoretische Grundlagen der Betonkorrosion.....	85
7.1.5	Modellierungsergebnisse	85
7.2	Mechanische Vorbemessung des Schachtverschlusses	88
7.2.1	Auslegungsbestimmende Deckgebirgslasten.....	88
7.2.2	Vorgehensweise bei der mechanischen Vorbemessung	89
7.2.2.1	Abschätzung der Tiefe der Auflockerungszone	90
7.2.2.2	Abschätzung der erforderlichen (fiktiven) Widerlagerlänge für kohäsive Widerlagerelemente.....	93
7.2.2.3	Abschätzung von Spannungen und Verformungen einer geschichteten Schottersäule.....	96
7.2.2.4	Abschätzung der zusätzlichen Setzung einer Schottersäule unter Erdbebenbelastung.....	99
7.3	Hydraulische Vorbemessung des Schachtverschlusses	104
7.3.1	Hydraulischer Druck der Deckgebirgswässer.....	104
7.3.2	Vorgehensweise bei der hydraulischen Vorbemessung	105
7.4	Plausibilitätsbetrachtung zur Vorbemessung der Streckenverschlüsse (Grundlage Strömungsbarrieren Asse)	107
8	Beschreibung des modifizierten Entwurfs für den Schachtverschluss	109
9	Bauablauf/Leistungsansätze.....	115

10	Vertiefte hydraulische Vorbemessung des Verschlusssystems.....	117
10.1	Verwendetes Rechenprogramm	118
10.2	Intakter Schachtverschluss (ständige Bemessungssituation).....	118
10.2.1	Grundlagen.....	118
10.2.2	Ergebnisse.....	122
10.2.3	Schlussfolgerungen zum Systemverhalten bei intaktem Schachtverschluss.....	126
10.3	Schachtverschluss im Versagensfall (außergewöhnliche Bemessungssituation)	126
10.3.1	Grundlagen.....	126
10.3.2	Ergebnisse.....	128
10.3.3	Schlussfolgerungen zum Systemverhalten bei Schachtverschlussversagen	133
10.4	Streckenverschlüsse bei Schachtverschlussversagen (ständige Bemessungssituation)	133
10.4.1	Grundlagen.....	133
10.4.2	Ergebnisse.....	136
10.4.3	Schlussfolgerungen zum Systemverhalten bezüglich der Auslegung der Streckenverschlüsse.....	141
10.5	Bewertung	142
11	Plausibilitätsbetrachtung zur thermischen Auslegung.....	145
12	Bewertung des Verschlusssystems auf Grundlage der Vorbemessung.....	147
	Glossar	149
	Literaturverzeichnis.....	151
	Abbildungsverzeichnis.....	165
	Tabellenverzeichnis.....	169

A	Autogenes Schwinden von Beton/Mörtel.....	173
B	Gegenüberstellung der Vorgehensweise bei der Sicherheitsanalyse für ein Endlager und beim Funktionsnachweis für eine geotechnische Barriere	179
C	Nachtrag zur Konkretisierung der Vorbemessung für den Schachtverschluss Gorleben 1.....	183
	Abbildungsverzeichnis der Anhänge	189
	Tabellenverzeichnis der Anhänge	191

1 Einleitung / Aufgabenstellung

Vorrangiges Ziel der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist eine umfassende und nachvollziehbar dokumentierte Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben mit dem Schwerpunkt Langzeitsicherheit. Das beinhaltet unter anderem die Planung des Verschlusses der technisch unvermeidbaren Perforation der geologischen Barriere. Bei den Planungen für den Verschluss eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente dient das im VSG-Vorhaben erarbeitete Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ als Leitlinie.

Zielsetzung der Planung ist, die das Verschlussystem bildenden geotechnischen Barrieren Schacht- und Streckenverschlüsse so zu gestalten und anzuordnen, dass der Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationslösungen über die Schachtverschlüsse und die mit Schotter versetzten Infrastrukturbereiche sowie die Streckenverschlüsse und die mit Salzgrus versetzten Strecken zu den endgelagerten Abfällen und die anschließende Auspressung kontaminierter Salzlösungen über den gleichen Pfad mindestens im Referenzszenarium /BEU 12/ und den damit verbundenen als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen nicht zu besorgen ist.

In Bezug auf die Alternativszenarien /BEU 12/ ist zu prüfen, ob und inwieweit das Verschlussystem so beeinträchtigt werden kann, dass eine Freisetzung von gelösten Radionukliden in die Biosphäre nicht ausgeschlossen werden kann. In diesem Fall soll eine Optimierung des Verschlussystems soweit durchgeführt werden, dass das Entwurfsziel nicht nur für das Referenzszenarium, sondern auch für die Alternativszenarien erreicht wird. Ist das nicht möglich, sind als Eingangsdaten für die Konsequenzenanalyse Art und Ort der Beeinträchtigung zu ermitteln sowie deren zeitliche Einordnung vorzunehmen.

Aufgrund des möglicherweise erforderlichen iterativen Prozesses (vgl. Abb. 2.1) ist das Verschlussystem dabei frühzeitig in seiner Entwurfsphase soweit zu konkretisieren, dass seine relevanten hydraulischen Kenngrößen für die begleitende Integritätsanalyse der geologischen Barriere und die nachfolgende Konsequenzenanalyse genutzt werden können. Aus diesem Grund wird eine Vorbemessung durchgeführt, deren Ergebnis bereits eine grundsätzliche Einschätzung der Funktionsfähigkeit des Verschlussystems zulässt.

Der Entwurf des Verschlusssystems und seine Vorbemessung sowie die aus der Vorbemessung resultierenden Modifikationen des Verschlusssystems sind Gegenstand dieser Unterlage. Weiterhin wird die Herstellbarkeit des Verschlusssystems bewertet.

Die Bearbeitung der Arbeitspakete erfolgte aufgrund des engen Zeitrahmens der VSG zeitlich parallel, so dass sich in einigen Fällen im Nachhinein Modifikationen ergaben. Auf diese wird im Bericht hingewiesen und sie werden nachträglich in Bezug auf ihre Relevanz bewertet.

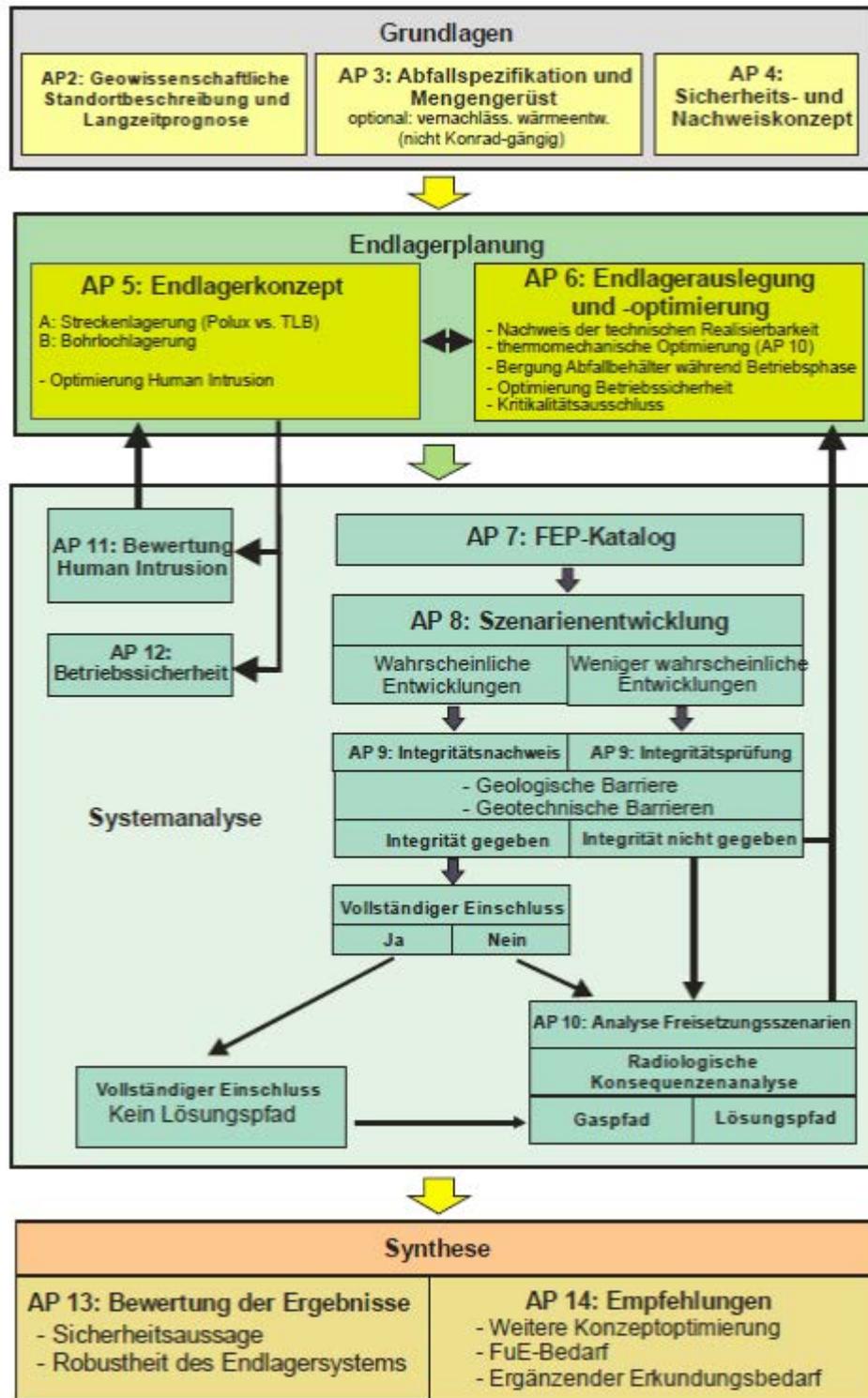


Abb. 2.1 Grobstrukturplan zur vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben, Stand 2010

2 Grundlagen für den Entwurf des Verschlusssystems

2.1 Standortspezifische Randbedingungen

2.1.1 Endlagerspezifische Randbedingungen und Stilllegungskonzept

Das Endlagerbergwerk wird durch 2 Schächte – Schacht 1 und Schacht 2 – erschlossen. Schacht 1 dient als einziehender Wetterschacht und wird für Personenfahrgung und Materialtransport genutzt. Schacht 2 ist ausziehender Wetterschacht und für den Abfallgebindertransport vorgesehen, der gegen den Wetterstrom erfolgt, vgl. Abb. 2.1. Für die Erschließung des Endlagerbergwerkes sollen die bereits existierenden Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2, die zum Zweck der Erkundung bisher bis in eine Teufe von 933 m (Schacht 1) und 840 m (Schacht 2) abgeteuft wurden, genutzt werden. Auch für die bereits vorhandenen Teile des Erkundungsbergwerkes dient Schacht Gorleben 1 als einziehender Wetterschacht und Schacht Gorleben 2 als ausziehender Wetterschacht. Die Planung des Endlagerbergwerkes sieht vor, die Erkundungssohle, die in 840 m Teufe aufgefahrgen wird, und die Einlagerungssohle, die sich planungsgemäß in 870 m Teufe befindet, mit Ausnahme der gemeinsam genutzten Schächte vollständig voneinander zu trennen. Aus diesem Grund sind sowohl auf der Erkundungssohle als auch der Einlagerungssohle voneinander unabhängige Infrastrukturbereiche vorgesehen, über die der Erkundungsbereich und der Einlagerungsbereich erschlossen werden.

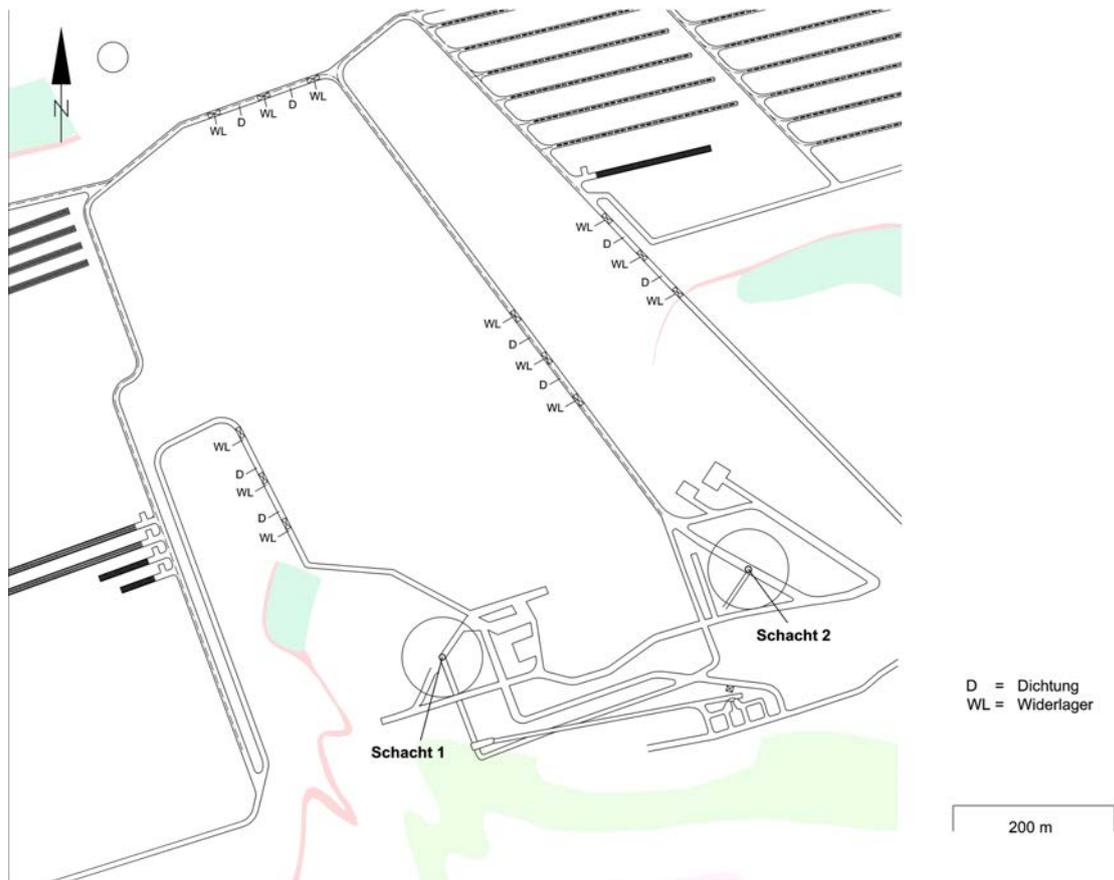


Abb. 2.1 Position der Schächte und der vier Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord auf der Einlagerungssohle /BOL 11/

Die beiden Schächte und die beiden Infrastrukturbereiche sind überwiegend im jüngeren Steinsalz der Leinefolge (z3) angeordnet, während sich der Einlagerungsbereich und damit auch der Erkundungsbereich im älteren Steinsalz der Staßfurtfolge (z2) befindet. Das jüngere Steinsalz der Leinefolge (z3) weist gegenüber dem älteren Steinsalz der Staßfurtfolge (z2) eine geringere Kriechfähigkeit auf und ist damit im bergmännischen Sinne „standfester“. Der Einlagerungsbereich ist im höher kriechfähigen älteren Steinsalz vorgesehen, um einen möglichst schnellen Einschluss der endgelagerten radioaktiven Abfälle zu erzielen.

Für die Einlagerungssohle wurden drei Einlagerungskonzepte vertieft untersucht /BOL 11/. Sie sind wie folgt definiert:

- **Einlagerungsvariante A.** Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern

- **Einlagerungsvariante B1¹**. Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in selbstabschirmenden Endlagerbehältern in horizontalen Strecken
- **Einlagerungsvariante C**. Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs)

Die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle (Einlagerungsvariante B1 oder C) ist im Ostflügel der Einlagerungssohle geplant, die Einlagerung der Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Einlagerungsvariante A) im Westflügel, vgl. Abb. 2.1.

Für die Stilllegung des Endlagerbergwerkes sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

- (1) Das Versetzen aller Einlagerungsstrecken und Querschläge der Einlagerungssohle mit naturtrockenem Salzgrus.
- (2) Das Versetzen der Richtstrecken und Erkundungsstrecken im Einlagerungs- und Erkundungsbereich mit geringfügig angefeuchtetem Salzgrus (Zielgröße für den Lösungsgehalt 0,6 Gew.-%).
- (3) Der direkte Kontakt von naturtrockenem und angefeuchtetem Salzgrus wird durch Dichtpfropfen vermieden, die sich im Kreuzungsbereich Querschlag – Richtstrecke in den Querschlägen befinden.
- (4) Im Anschluss an die mit Salzgrus versetzten Streckenbereiche werden in den Zugangsstrecken zu den Infrastrukturbereichen der Einlagerungssohle und Erkundungssohle im höher kriechfähigen älteren Steinsalz Streckenverschlüsse angeordnet. Auf der Einlagerungssohle befinden sich die Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbereichen, d. h. im Querschlag West, Mitte und Ost. Weiterhin trennt auf der Einlagerungssohle ein Streckenverschluss in der Richtstrecke Nord die Einlagerungsbereiche Ost für wärmeentwickelnde Abfälle und West für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Die Position der Streckenverschlüsse auf der Einlagerungssohle ist in Abb. 2.1 dargestellt.

¹ Im Rahmen einer Differenzbetrachtung wurde auch eine Einlagerungsvariante B2, die Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern, untersucht. Sie wird hier nicht betrachtet.

- (5) Die Infrastrukturbereiche werden jeweils mit Hartgesteinschotter verfüllt, um einen relevanten hydraulischen Druckaufbau auf die Streckenverschlüsse durch ggf. zutretende Lösungen zu vermeiden oder wenigstens zu verzögern.
- (6) In den beiden Schächten sind Schachtverschlüsse vorgesehen.

Die vier Streckenverschlüsse auf der Einlagerungssohle werden im Folgenden mit Streckenverschluss West, Mitte, Ost und Nord bezeichnet.

Im Verlauf der Planung wurde zu einem späteren Zeitpunkt, als die Schnittstelle zwischen den vorhandenen Teilen des Erkundungsbergwerkes und dem Endlagerbergwerk vertieft betrachtet wurde, festgestellt, dass die Einlagerungssohle aufgrund der geologischen und bergbauspezifischen Gegebenheiten im Teufeniveau 880 m (statt 870 m) an den Schacht Gorleben 1 angebunden werden muss. Die Ursache dafür liegt im Verlauf der Gorleben-Bank und der Anbindung der bestehenden Teile des Erkundungsbergwerkes im Teufeniveau 840 m, 880 m und 930 m an den Schacht Gorleben 1. Schacht Gorleben 2 ist bisher nur bis 840 m geteuft und im Teufeniveau 820 m und 840 m Teufe an die bestehenden Teile des Erkundungsbergwerkes angebunden. Bzgl. der Anbindung der Einlagerungssohle an den Schacht Gorleben 2 besteht somit noch planerische Freiheit.

2.1.2 Geologische Randbedingungen

Bei dem Salzstock Gorleben handelt es sich um einen langgestreckten Salzdiapir. Der Salzspiegel befindet sich etwas unterhalb von 255 m Teufe. Für den Schacht Gorleben 1 ist die Lage des Salzspiegels mit 256 m Teufe angegeben, in Schacht Gorleben 2 mit 257,2 m Teufe. Das Deckgebirge besteht im Wesentlichen aus quartären und tertiären Sedimenten (Lockergesteinen) und wird vom Salinar des Salzspiegels durch das Hutgestein (Gipshut) getrennt, das durch Subrosion des Salzstocks entstanden ist. Die geologische Standortcharakterisierung des Standortes Gorleben ist in /BGR 03/ detailliert beschrieben.

Da die Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2 bereits abgeteuft sind, ist eine geologische Detailaufnahme der Schächte vorhanden /DBE 09a/, /DBE 09b/. Die geologische Aufnahme der Schächte ist Bestandteil der Schnittrisse Querschlag 1 West (Abb. 2.2) Querschlag 1 Ost (Abb. 2.3) und des Schnittrisses zwischen den Schächten S1-S2 (Abb. 2.4) /BOR 02/. Der Schnittriss Querschlag 1 West stellt den am besten erkunde-

ten Schnitt dar, der auch das ältere Steinsalz umfasst. Er wird als repräsentativ für die nicht erkundeten Bereiche des Endlagers angenommen und der Auslegung des Endlagers /BOL 12/ sowie den Integritätsbetrachtungen zur geologischen Barriere /KOC 12/ als Standortmodell zu Grunde gelegt.

Im Bereich der Schächte, in denen Schachtverschlüsse anzuordnen sind, sind die nachfolgend aufgeführten stratigrafischen Einheiten der Leinefolge aufgeschlossen.

- z3AM (Anhydritmittelsalz)
- z3BT (Buntes Salz)
- z3BK/BD (Bank/Bändersalz)
- z3OSO (Oberes Orangesalz)
- z3OSM (Gorleben-Bank)
- z3OSU (Unteres Orangesalz)
- z3LS (Liniensalz)

Im Bereich der Schächte liegen die genannten stratigrafischen Einheiten mehrfach verfalltet vor, vgl. Abb. 2.2, Abb. 2.3 und Abb. 2.5. Im Schacht Gorleben 1 ist nahe am Salzspiegel das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) aufgeschlossen, das in dieser unmittelbaren Nähe zum Salzspiegel abgelaugt ist /DBE 09a/.

Die Anordnung der Streckenverschlüsse ist im älteren Steinsalz geplant. Während die Positionen der Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost sich im Wesentlichen im z2HS2 (Streifensalz) und z2HS1 (Knäuelsalz) befinden, ist der Streckenverschluss Nord im z2HS3 (Kristallbrockensalz) angeordnet, vgl. Abb. 2.6. Bei den Streckenverschlüssen West, Mitte und Ost ist zu berücksichtigen, dass an ihrem südlichen Ende möglicherweise z2HG-UE (Hangendsalz/Übergangssalz) sowie in dessen Folge z2SF (Kaliflöz Staßfurt) angetroffen werden kann. Dieser Sachverhalt ist nach erfolgter Erkundung bei der Planung zu berücksichtigen, stellt aber keine Schwierigkeit dar.

Potenzielle Zutritte salzstockinterner Lösungen sind nur im Bereich des jüngeren Steinsalzes und nur in sehr geringem Umfang von einigen 1.000 m³ möglich /BEU 12/.

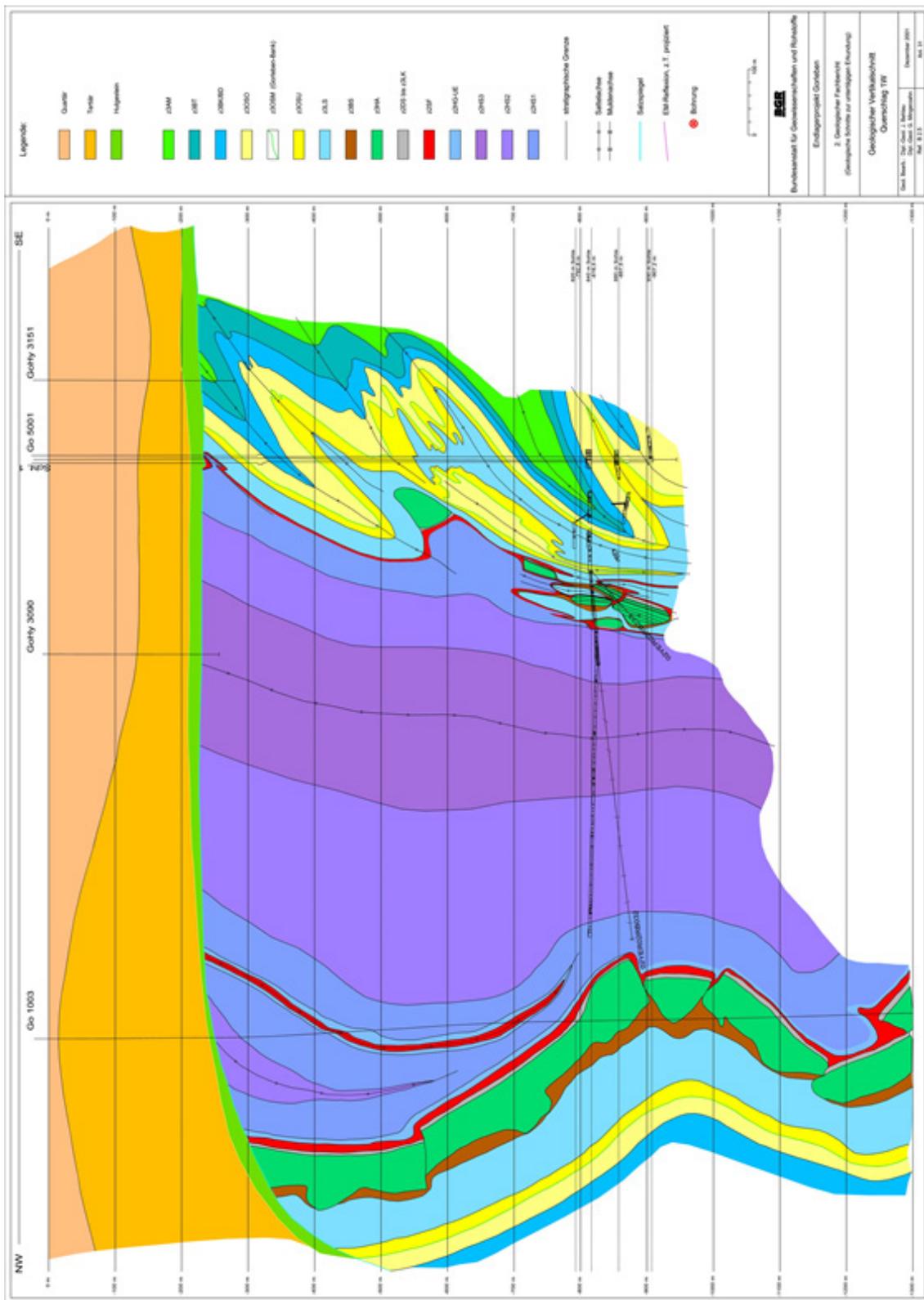


Abb. 2.2 Geologie – Schnitttriss entlang Querschlag 1 West /BOR 02/

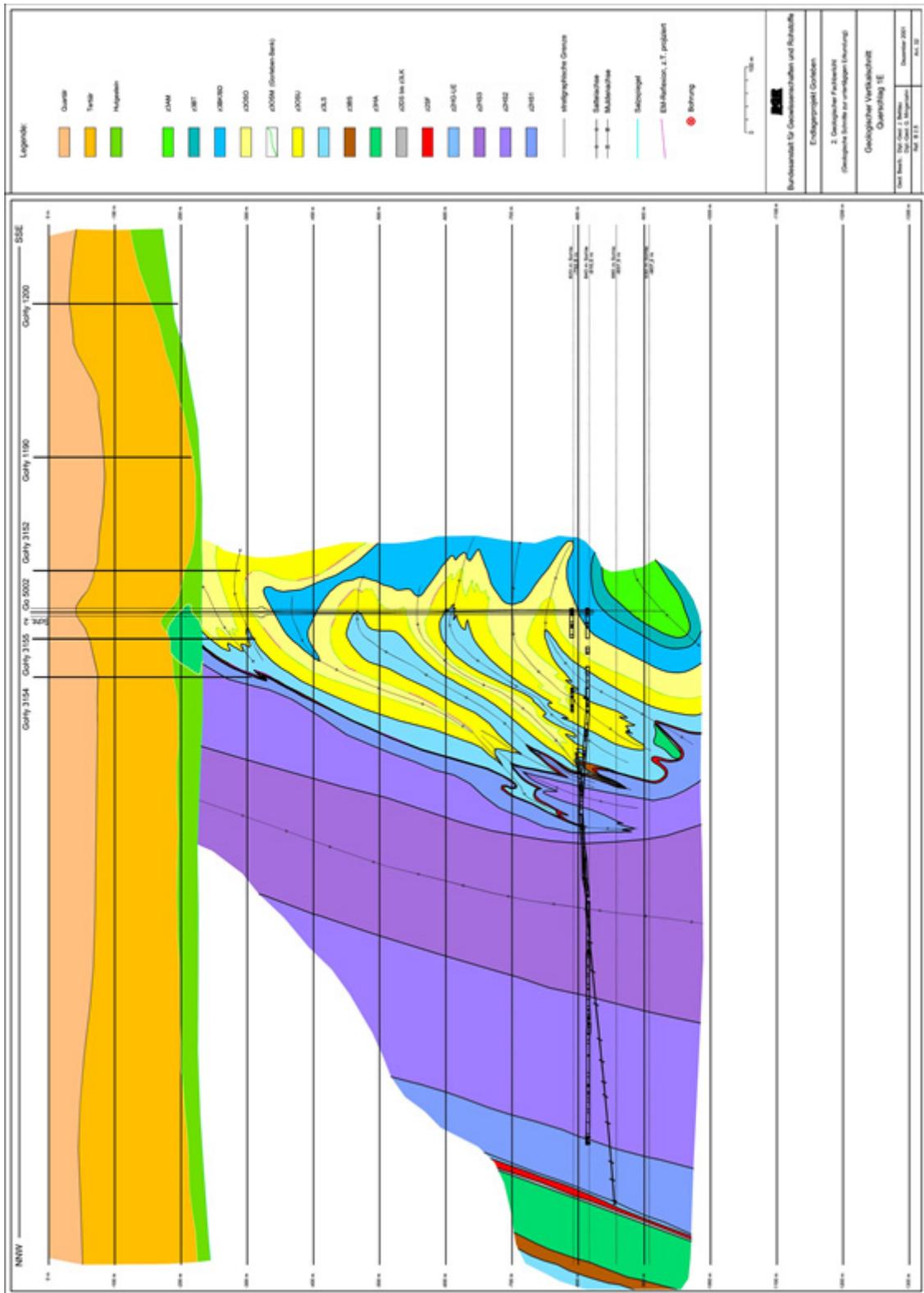


Abb. 2.3 Geologie – Schnittriss entlang Querschnitt 1 Ost /BOR 02/

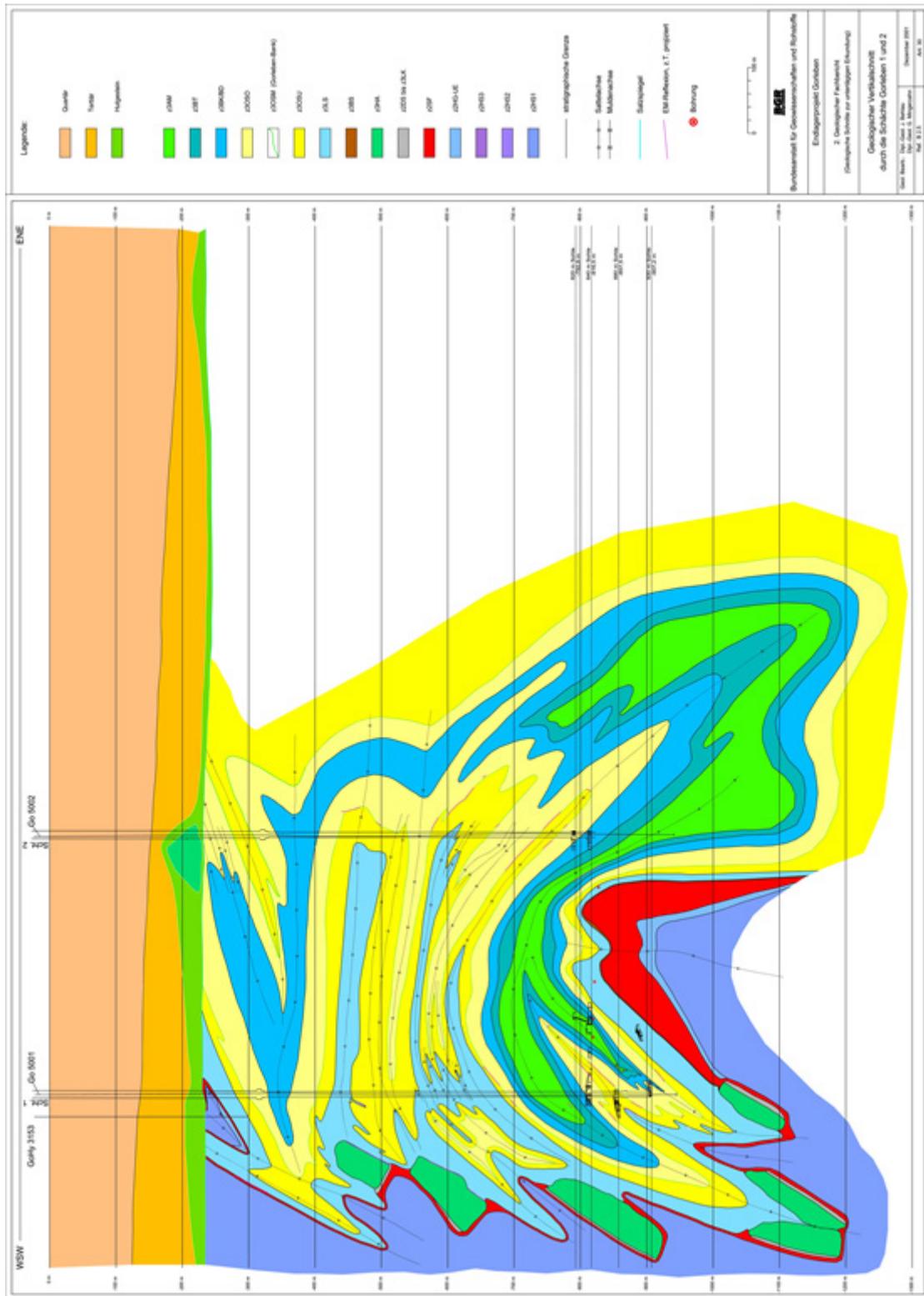


Abb. 2.4 Geologie – Schnitttriss zwischen den Schächten Gorleben 1 und Gorleben 2 /BOR 02/

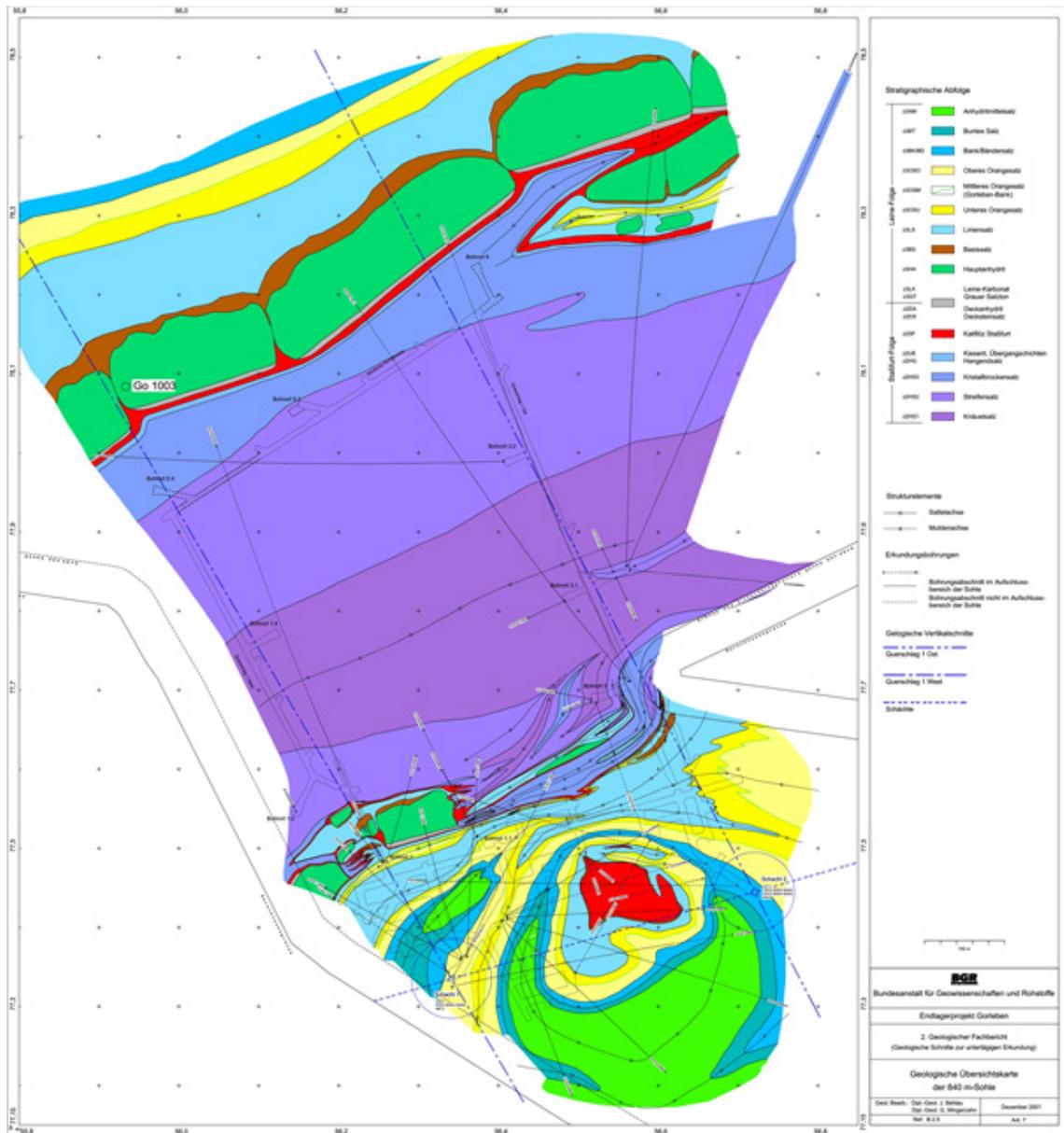


Abb. 2.5 Geologie – Sohlenriss 840 m-Sohle /BOR 02/

gung zu. Die wesentlichen hydrogeologischen Daten sind für den Schacht Gorleben 1 in Tab. 2.1 und für den Schacht Gorleben 2 in Tab. 2.2 aufgeführt. Die Tabellen wurden /KLI 11/ entnommen.

Tab. 2.1 Hydrogeologische Charakterisierung des Deckgebirges im Bereich des Schachtes Gorleben 1 /KLI 11/

Schacht Gorleben 1					
Teufe bis m	Stratigrafie	Petrografie	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	Hydrogeologie	Salzgehalt der Porenwasser
25	Quartär, Weichsel	Sand	$5 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$	Grundwasserleiter	Süßwasser bis schwach salin (Salzgehalt: 0,1 bis 5 g/l)
71	Quartär, Saale	Sand	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$		
74	Quartär, Elster, Lauenburger-Ton-Komplex	Ton, Schluff	$< 1 \times 10^{-8}$	Grundwassergeringleiter	
108	Quartär, Elster	Sand	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	Grundwasserleiter	
144	Quartär, Elster	Geschiebemergel	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$	Grundwassergeringleiter	Salin (10 – 30 g/l)
151	Quartär, Elster	Sand	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	Grundwasserleiter	
158	Quartär, PräElster	Sand	$1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}$	Grundwasserleiter	
167	Tertiär	Ton	$< 1 \times 10^{-8}$	Grundwassergeringleiter	
207	Tertiär	Ton, Feinsand	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$	Grundwassergeringleiter	Stark salin bis gesättigte Sole (50 – 320 g/l)
228	Tertiär, Brüsselsand	Feinsand	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6}$	Grundwasserleiter	
236	Tertiär	Ton, Feinsand	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$	Grundwassergeringleiter	
255	Hutgestein	Gips, Anhydrit	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$	Kluftgrundwasserleiter	Gesättigte Sole (320 g/l)
ab 255	Zechstein, Salinar	Steinsalz	-		

Tab. 2.2 Hydrogeologische Charakterisierung des Deckgebirges im Bereich des Schachtes Gorleben 2 /KLI 11/

Schacht Gorleben 2					
Teufe bis m	Stratigrafie	Petrografie	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	Hydrogeologie	Salzgehalt der Porenwasser
22	Quartär, Weichsel	Sand	$5 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$	Grundwasserleiter	Süßwasser bis schwach salin (Salzgehalt: 0,1 bis 5 g/l)
65	Quartär, Saale	Sand	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$		
113	Quartär, Elster, Lauenburger-Ton-Komplex	Ton, Schluff	$< 1 \times 10^{-8}$	Grundwassergeringleiter	Salin (10 – 30 g/l)
123	Quartär, Elster	Sand	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	Grundwasserleiter	Salin (10 g/l)
171	Quartär, Elster	Geschiebemergel	$1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$	Grundwassergeringleiter	Salin (10 – 40 g/l)
176	Quartär, Elster	Sand	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$	Grundwasserleiter	
195	Tertiär	Ton, Feinsand	$1 \times 10^{-8} - 2 \times 10^{-6}$	Grundwassergeringleiter	
255	Hutgestein	Gips, Anhydrit	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-4}$	Kluftgrundwasserleiter	Gesättigte Sole (320 g/l)
ab 255	Zechstein, Salinar	Steinsalz	–		

2.1.4 Ausbau von Schächten und Zugangsstrecken

2.1.4.1 Schächte

Im Bereich des Deckgebirges ist in beiden Schächten ein wasserdichter Ausbau vorhanden. Der wasserdichte Ausbau besteht aus einem Außenausbau und einem Innenausbau, die durch eine Asphaltfuge voneinander getrennt sind (Abb. 2.7). Während der Außenausbau von Aufstands- und Aufhängefundamenten gehalten wird, ist der Innenausbau auf einem Schachtfundament (Innenausbaufundament) abgesetzt, das sich im Salinar deutlich unterhalb des Salzspiegels befindet und das die Lasten des Innenausbaus in das Salinar einleitet. Unterhalb der Innenausbaufundamente ist die Schachtkontur durch Stützringe gesichert, um Ausbrüche aus der Schachtkontur in Folge der

konzentrierten Lasteinleitung unterhalb des Innenausbaufundamentes zu vermeiden. Der wasserdichte Ausbau des Schachtes Gorleben 1 und seine Abmessungen sind in Abb. 2.8 dargestellt. Der wasserdichte Ausbau von Schacht Gorleben 2 ist praktisch baugleich, deshalb wird auf seine Darstellung verzichtet. Im Schachtausbau sind erhebliche Mengen an Stahl und Normalbeton verbaut. Detailliertere Informationen zum Schachtausbau finden sich in /LIN 12/.

Unterhalb der Stützringe sind die Schächte unausgebaut und lediglich bereichsweise durch Maschendrahtverzug gesichert. Im unausgebauten Salinarteil der Schächte beträgt der Schachtdurchmesser direkt unterhalb der Stützringe 7,63 m /DBE 07/.

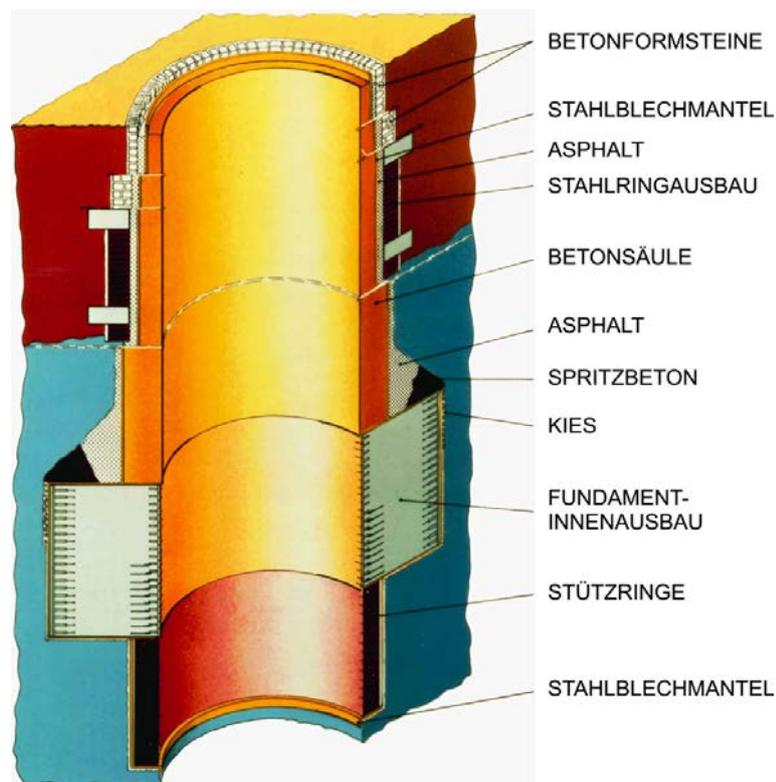


Abb. 2.7 Schacht Gorleben 1, wasserdichter Ausbau im Bereich des Salzspiegels (Quelle: DBE)

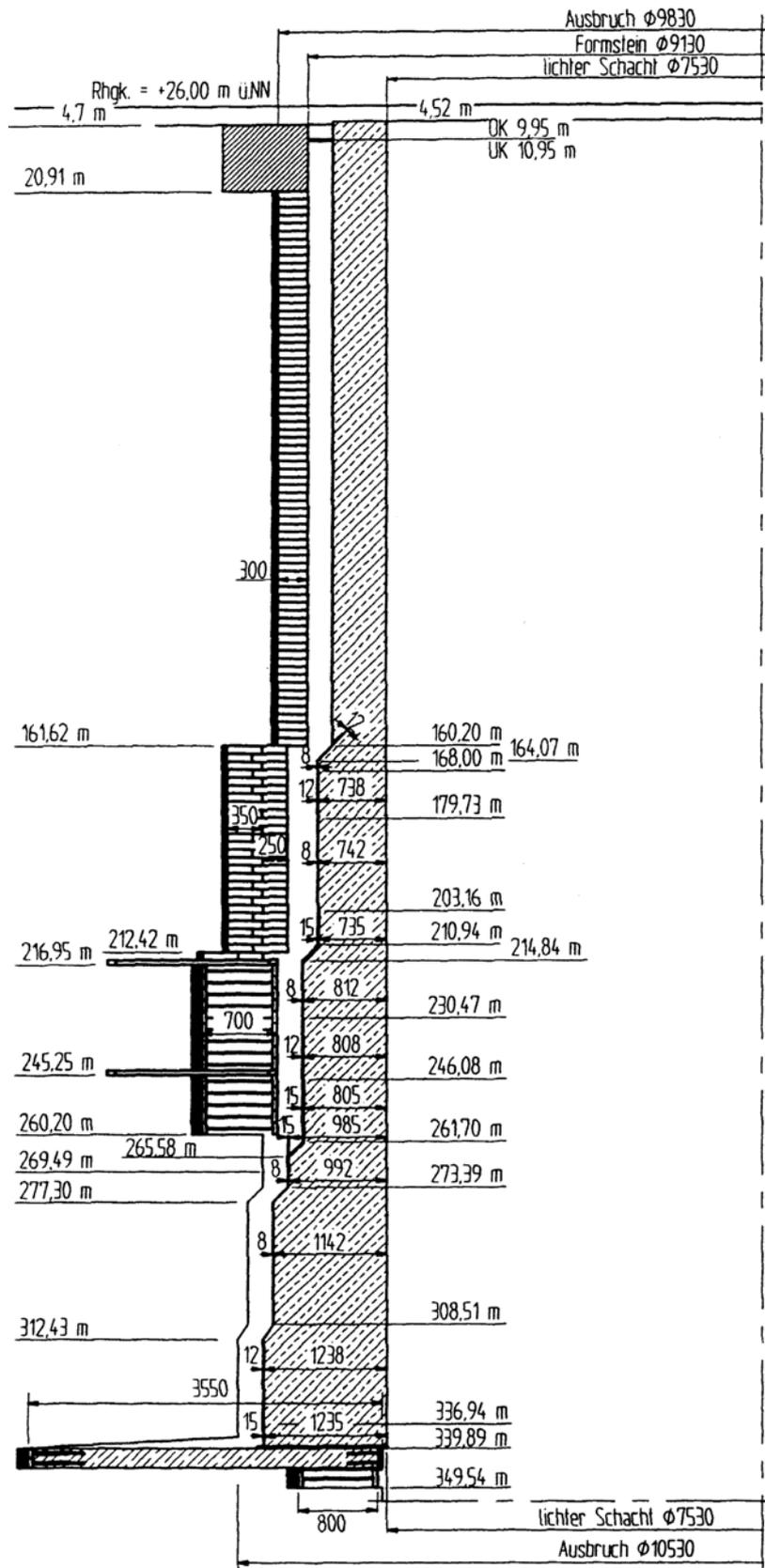


Abb. 2.8 Schacht Gorleben 1, wasserdichter Ausbau /JES 95/

In den Schächten Gorleben 1 und Gorleben 2 sind jeweils fünf Erkundungshorizonte vorhanden, die beim Abteufen der Schächte eingerichtet wurden und umfangreich geotechnisch instrumentiert sind. Für die Erkundungshorizonte sind dementsprechend Messdaten vorhanden, die den Zeitbereich der Existenz der Schächte praktisch abdecken. Im Schacht Gorleben 1 sind Erkundungshorizonte mit den Bezeichnungen EH-350, EH-450, EH-550, EH-650 und EH-720 eingerichtet, im Schacht Gorleben 2 die Erkundungshorizonte EH-370, EH-450, EH-570, EH-670, EH-760. EH steht für Erkundungshorizont, die folgende Zahl gibt das Niveau des Erkundungshorizontes in m mit Bezug auf NN an.

2.1.4.2 Zugangsstrecken

Für die Zugangsstrecken, deren Streckenprofil dem der Richtstrecken entspricht, ist kein Ausbau geplant, vgl. Abb. 2.9 und Abb. 2.10. Im Hinblick auf die Errichtung von Streckenverschlüssen ist zu berücksichtigen, dass sich auf der Sohle eine Fahrbahn befindet, die entfernt werden muss. Die Gleise für den Abfallgebindertransport und das zugehörige Schotterbett müssen ebenfalls rückgebaut werden. Der Rückbau ist auch in Streckenbereichen erforderlich, in denen langfristig die Barrierewirkung von kompaktiertem Salzgrus in Ansatz gebracht wird.

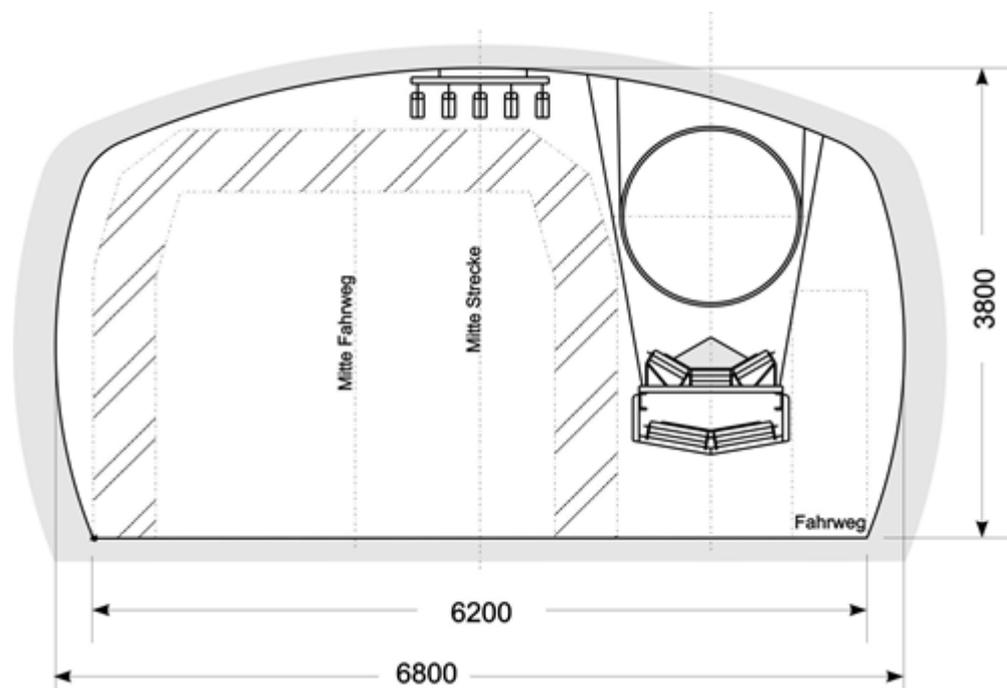


Abb. 2.9 Streckenquerschnitt (Mindestprofile) Richtstrecke Süd (Streckenverschluss Ost und West) /BOL 11/

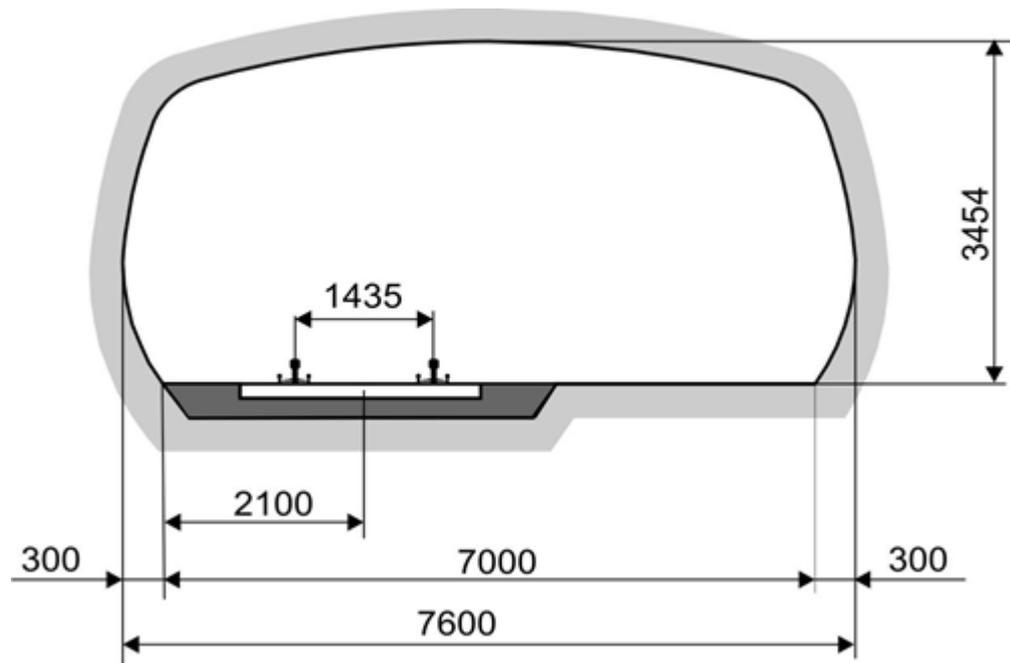


Abb. 2.10 Streckenquerschnitt (Mindestprofile) Richtstrecke Nord
(Streckenverschluss Nord und Mitte) /BOL 11/

2.2 Entwurfsannahmen für das Verschlusskonzept

Nachstehend sind die Entwurfszielsetzung und Entwurfsannahmen für das Verschluss-system aufgeführt.

2.2.1 Übergeordnete Anforderungen

Gemäß Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ und des die Sicherheitsanforde-rungen konkretisierenden Sicherheits- und Nachweiskonzeptes hat das Verschluss-sys-tem als schnell wirksame Barriere den Einschluss der Abfälle in dem Zeitraum zu übernehmen, in dem das Versatzmaterial Salzgrus seine Dichtwirkung noch nicht ent-faltet. Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ besagen, dass der gleichzeiti-ge Ausfall von mehreren unabhängigen technischen Komponenten nicht unterstellt werden muss. Deshalb werden für das Verschluss-system mit Schacht- und Stre-ckenverschlüssen zwei unabhängige in Reihe angeordnete geotechnische Barrieren vorgesehen .

Gemäß bautechnischem Regelwerk /CEN 10/ ist für Bauwerke, deren Versagen eine potenzielle Gefahr für Leben und Gesundheit bedeutet, ein Zielwert der Versagens-

wahrscheinlichkeit² von 10^{-4} bezogen auf den planmäßigen Funktionszeitraum (Lebensdauer) zuzuordnen, dem das bautechnische Regelwerk auf empirischer Basis Rechnung trägt. Der planmäßige Funktionszeitraum eines Bauwerkes wird dabei mit 50 bis maximal 100 Jahren angesetzt. Unterstellt man, dass ein solcher Zielwert der Versagenswahrscheinlichkeit auch für geotechnische Barrieren (Abdichtbauwerke), die Bestandteil eines Verschlussystems für ein geologisches Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle sind, erreicht wird, beträgt die Wahrscheinlichkeit eines kombinierten Versagens von Schacht- und Streckenverschluss 10^{-8} , wobei der Funktionszeitraum noch zu quantifizieren ist. Prinzipiell ist somit ein Verschlussystem, das zwei unabhängige in Reihe angeordnete geotechnische Barrieren beinhaltet und gemäß bautechnischem Regelwerk ausgelegt wird, in der Lage, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen, da der Ausfall beider geotechnischer Barrieren den unwahrscheinlichen Entwicklungen ($< 1\%$ im Nachweiszeitraum) zuzuordnen ist.

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ wird festgestellt, dass das optimale Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches dann gegeben ist, wenn es zu keinem Kontakt zwischen Lösungen und Abfällen kommt und wenn keine Radionuklide über den Gaspfad aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden. Ein vollständiger Einschluss ist gemäß Sicherheits- und Nachweiskonzept aber auch dann gegeben, wenn es zwar zu einem Lösungskontakt mit den Abfällen kommt, aber keine Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden, und zwar weder über den Lösungspfad noch über den Gaspfad.

Mit Bezug auf die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ und das Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ wird der Entwurf des Verschlussystems – wie auch in der Aufgabenstellung aufgeführt – mit der Zielsetzung vorgenommen, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den Abfällen im Referenzszenarium /BEU 12/ und den zugeordneten wahrscheinlichen Entwicklungen zu vermeiden. Im Falle weniger wahrscheinlicher Alternativszenarien /BEU 12/ ist das Entwurfsziel, den Austritt gelöster Radionuklide bzw. kontaminierter Lösungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich soweit zu beschränken, dass hinsichtlich eines lösungsge-

² Anmerkung: In /WAG 05/ werden Versagenswahrscheinlichkeiten $> 10^{-4}$ für das Versagen eines Bentonitdichtelements angegeben. Die dort ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten sind auf Basis lokal formulierter Versagenskriterien ermittelt, die für das gesamte Dichtelement als gültig angenommen werden. Sie stellen deshalb eine konservative Obergrenze für die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit dar.

bundenen Transports der sichere Einschluss gewährleistet ist. Der Gaspfad wird in Bezug auf den Entwurf des Verschlussystems nicht berücksichtigt, da seine repräsentativen Kenngrößen für das Verschlussystem erst im Rahmen eines iterativen Prozesses unter Berücksichtigung von Ergebnissen der Konsequenzenanalyse festgelegt werden können, vgl. auch Abb. 2.1. Der Gaspfad wird deshalb zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen der vertieften Nachweisführung /MÜL 12c/ betrachtet und überprüft. Die Verhinderung bzw. Begrenzung eines Lösungszutritts zu den Abfällen ist hierfür jedoch bedeutsam. Dadurch wird die Gasbildung und somit die Transportleistung des Gaspfades und der Aufbau hoher Gasdrücke erheblich begrenzt. Die Berücksichtigung der Ergebnisse zum Gaspfad erfolgt im Rahmen der Optimierung.

2.2.2 Betrachtungszeitraum für die Funktionsfähigkeit

Wie in /MÖN 12/ ausgeführt, hat das Verschlussystem den Einschluss der Abfälle in dem Zeitraum zu übernehmen, in dem der Salzgrusversatz seine Dichtwirkung noch nicht entfaltet. Im Umkehrschluss lässt sich ableiten, dass die Dichtfunktion des Verschlussystems nicht mehr erforderlich ist, wenn der Salzgrusversatz die Dichtfunktion übernimmt. Der erforderliche Zeitraum für die Salzgruskompaktion war zum Zeitpunkt des Entwurfs des Verschlussystems noch nicht bekannt. Aus diesem Grund wurde für den Entwurf des Verschlussystems von folgender, erster Entwurfsannahme ausgegangen. Der maximale Funktionszeitraum des Verschlussystems ist begrenzt durch das Auftreten der nächsten Eiszeit, die gemäß geologischer Langzeitprognose in ca. 50.000 Jahren auftritt /MRU 11/. Da für Teile des Verschlussystems, insbesondere für die geotechnische Barriere Schachtverschluss, die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge von grundlegender Bedeutung sind (vgl. Kapitel 2.1.3), eine Prognose der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge während und nach der nächsten Eiszeit nicht möglich ist, wird der Funktionszeitraum des Verschlussystems auf den Zeitraum bis zur nächsten Eiszeit beschränkt. Im Nachgang wurde durch Modellrechnungen geprüft, ob der Salzgrusversatz tatsächlich innerhalb eines Zeitraums < 50.000 Jahre die Dichtfunktion übernimmt.

Dazu ist anzumerken, dass nach Ende des Funktionszeitraums das Verschlussystem durchaus funktionstüchtig sein kann, es bestehen lediglich keine Funktionsanforderungen mehr an alle oder einige seiner Komponenten.

2.2.3 Sonstige Vorgaben für den Entwurf

Aus den Erfahrungen bei der Stilllegung und Verwahrung von Schächten im deutschen Salzbergbau in den letzten 80 Jahren resultieren nachfolgende Vorgaben (siehe z. B. /LEI 07/, /OCZ 96/, /SAL 92/, /SCH 95/ bzw. /GSF 06/ für eine Zusammenfassung):

- Salzschächte werden nach der Stilllegung vollständig verfüllt.
- Vor der Verfüllung sollten Schachteinbauten vollständig entfernt werden, soweit das arbeitssicherheitlich vertretbar ist.
- Vorhandener wasserdichter Ausbau aus Tübbing oder Stahlröhren wird nicht demontiert.
- In Verschlusshorizonten wird der Ausbau entfernt, um Umläufigkeiten zu verhindern.
- In Verschlusshorizonten wird die Auflockerungszone im Schachtstoß entfernt.
- Die Sohlenabgänge werden gegen das Auslaufen der Füllsäule gesichert und z. B. mit kohäsivem Füllgut abgedämmt.
- Verschlussbauwerke innerhalb der Schachtröhre müssen direkten Kontakt zum Gebirge haben; sie sind somit gebirgsverbunden³ auszuführen.
- Der Einbau der Verfüllsäulen erfolgt im trockenen Milieu.

Im Hinblick auf die Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2 bedeutet das, dass sinngemäß der Verbleib der wasserdichten Ausbauten im Deckgebirge, auch wenn es sich nicht um Tübbinge oder Stahlröhren handelt, als Planungsrandbedingung anzusetzen ist, wobei jedoch der Grad ihrer Funktionsfähigkeit offen ist.

Soweit sinngemäß zutreffend, können die Vorgaben für Schachtverfüllungen auch auf Streckenverfüllungen übertragen werden.

³ Anmerkung: Gebirgsverbunden bedeutet hier nicht wie in der allgemeinen Sprechweise kohäsiver Verbund, sondern ist als direkter Kontakt zwischen dem Material des Dichtelementes und dem Gebirgsstoß zu verstehen – ohne Anordnung spezieller Gleitfugen.

2.3 Technische Entwurfsgrundlagen und Bewertung der Herstellbarkeit

Der Stand von Wissenschaft und Technik zu Schacht- und Streckenverschlüssen ist in /ISI 08/ mit Stand 2008 zusammengefasst. Zusätzliche Informationen liegen aus dem Projekt Asse-Vordamm vor /BFS 10/ sowie aus dem In-situ-Versuch Abdichtbauwerk im Steinsalz, der derzeit im ERAM durchgeführt wird /MAU 12/. Weiterhin ist zwischenzeitlich das FuE-Projekt CARLA abgeschlossen /KNO 05/, /KNO 10/, und es liegen Ergebnisse aus druckbeaufschlagten Versuchsbauwerken in der Asse vor, vgl. z. B. /KAM 12/. Auf eine Darstellung des Standes von Wissenschaft und Technik wird deshalb an dieser Stelle verzichtet und auf die genannten Unterlagen verwiesen.

Die für den Bau von Verschlüssen zur Verfügung stehenden Baustoffe sind in der nachstehend aufgeführten Auflistung angegeben, die im Wesentlichen /ISI 08/ entnommen wurde. Ergänzend sind der natürliche Salzton /GSF 06/ sowie prinzipiell Baustoffe aufgeführt, die Anhydrit als Bindemittel enthalten /MIS 02/. Folgende Baustoffe gelten somit im salinaren Umfeld prinzipiell als einsetzbar:

- Arteigene Materialien
 - Salzgrus (ggf. mit Zusatzstoffen wie Bentonit)
 - Salzbriketts/-blöcke
 - SVV (selbstverheilender Versatz; bei Zutritt von Lauge erhärtender Salzversatz /HER 07/)
 - AISKRISTALL⁴ (bei Einbau erhärtende Evaporitminerale /LEU 07/)
- Basalt
- Bitumen/Asphalt
- Bentonit/Salzton
- Beton mit Hartgesteinszuschlag (Solebeton mit Bindemittel Zement oder MgO und Salzlösungen als Anmischflüssigkeit)

⁴ Es handelt sich um eine Baustoffgruppe auf Grundlage von dehydriertem Magnesiumsulfat, die im Rahmen des FuE-Vorhabens AISKRISTALL = Abdichtung von Wegsamkeiten mit kristallisierenden Evaporitmineralen untersucht wurde.

- Beton mit Salzzuschlag (Salzbeton mit Bindemittel Zement oder MgO)⁵
- Baustoffe mit Anhydrit als Bindemittel /KNO 05/, /MIS 02/

Die Bezeichnung Beton wird dabei nicht im strengen Sinne verwendet, so werden z. B. häufig auch Salzmörtel als Salzbetone bezeichnet.

Vorstehende Auflistung zeigt, dass ein in den letzten Jahrzehnten entwickeltes, umfangreiches Materialsortiment zur Konstruktion von Verschlüssen (Dicht- und Widerlagerelementen) verfügbar ist.

Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt geprüft, welche Materialien bereits großtechnisch untertägig im Salinar erprobt wurden, vorzugsweise im Maßstab 1:1. Dies begründet sich wie folgt:

- (1) Die großtechnische Erprobung gibt automatisch Aufschluss über die erfolgreiche Erprobung der Einbringtechnik und ermöglicht die Schätzung belastbarer Leistungsansätze.
- (2) Durch den Praxistest ist belegt, dass die Bauzustände beherrschbar und – bei ausreichender Datenlage – auch bewertbar sind.
- (3) Die Datenlage für einen bautechnischen Nachweis ist – sofern ausreichend dokumentiert – zumindest nach dem Stand der Technik gegeben.
- (4) QS-Programme sind i. d. R. verfügbar und zwar in einer umsetzbaren und konkreten Form.
- (5) Unter der Voraussetzung der Gültigkeit von (1) bis (4) können technische Spezifikationen erstellt werden, auf deren Basis z. B. Eignungsprüfungen durchgeführt werden können.

Aufgrund der fehlenden großtechnischen Erprobung werden die Baustoffe SVV, AIS-KRISTALL sowie die Baustoffe auf Anhydritbasis für den Entwurf des Verschlusssystems zurückgestellt⁶.

⁵ Zementgebundener Salzbeton wird entsprechend dem allgemeinen Sprachgebrauch im Folgenden verkürzt als Salzbeton und MgO-gebundener Beton als Sorelbeton bezeichnet.

Bei Bitumen und Asphalten handelt es sich um bewährte Wasserbaumaterialien, die auch seit langem im Salinar eingesetzt werden. Eine erfolgreiche, veröffentlichte, ausreichend dokumentierte großtechnische Erprobung lag zum Zeitpunkt des Entwurfs des Verschlussystems nicht vor. Deshalb wurde die Verwendung der Materialgruppe vorläufig zurückgestellt. Nunmehr liegen die Ergebnisse aus dem Projekt CARLA vor /KNO 10/, so dass im Rahmen einer Optimierung die Anwendung von Bitumen/Asphalt überprüft werden sollte. Ein Anwendungsversuch – die Verfüllung eines Wetterrolllochs – ist im ERAM in 2013 geplant.

Im Gegenzug liegt aus folgenden Verschlussprojekten die großtechnische Erprobung mit veröffentlichten Ergebnissen und Materialspezifikationen vor:

- Bentonit aus dem FuE-Projekt Schachtverschluss Salzdetfurth /BRE 02/ (Abb. 2.11)
- Hartgesteinschotter aus dem FuE-Projekt Schachtverschluss Salzdetfurth /BRE 02/
- Salzbeton/-mörtel mit Zement als Bindemittel aus den Projekten Asse-Vordamm /BFS 10/ sowie ERAM-in-situ-Versuch Abdichtbauwerk im Steinsalz /MAU 12/ (Abb. 2.12)
- Sorelbetone mit MgO als Bindemittel aus den Projekten BSB Asse (z. B. /BFS 09/, /KAM 12/) und CARLA /KNO 05/, /KNO 10/, (Abb. 2.13)
- Verdichtetes Salzgrus von der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) /HUR 97/

⁶ Bei Notwendigkeit bzw. im Rahmen einer späteren Optimierung können die Baustoffe wieder in die Planungen einbezogen werden.

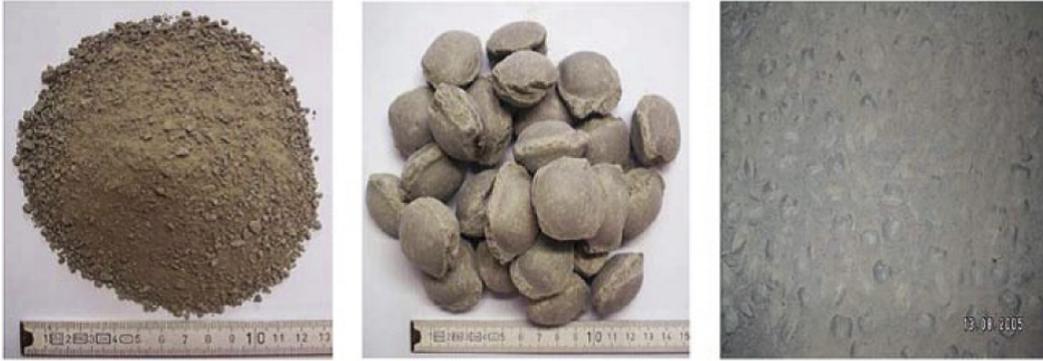


Abb. 2.11 Schachtverschluss Salzdetfurth. Bestandteile des binären Bentonitmischungs und eingebauter Zustand /WIL 08/

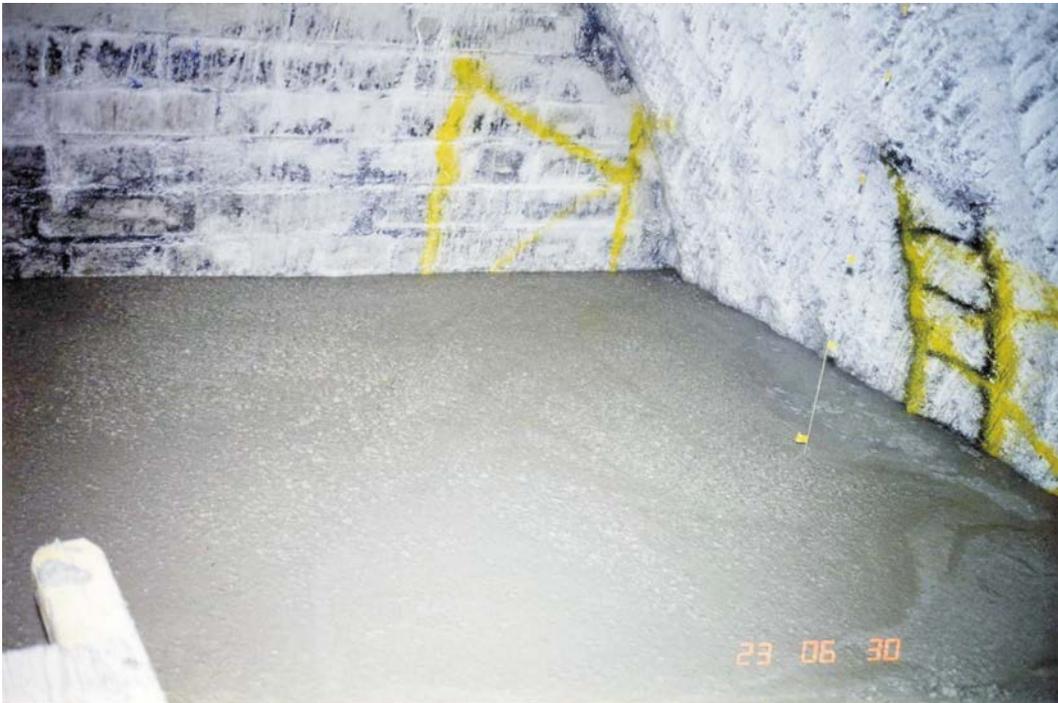


Abb. 2.12 Betonage des ASSE-Vordamms (Quelle: GSF)



Abb. 2.13 Einbringen des Sorelbetons A1 in eine Widerlagerbox /BFS 09/

Von den großtechnisch unter in-situ-Bedingungen erprobten Baustoffen sind folgende für die Herstellung von Dichtelementen geeignet:

- (1) Bentonit
- (2) Salzbetone
- (3) Sorelbetone
- (4) Künstlich verdichteter, kompaktierter Salzgrus (langfristig)

Während der unter (1) aufgeführte Bentonit zusätzlich Widerlager benötigt, sind die Materialien unter (2) bis (4) i. d. R. eigentragfähig und können sowohl zum Bau von Dichtelementen als auch von Widerlagern eingesetzt werden. Weitere bewährte Materialien für Widerlager sind Hartgesteinschotter (Basaltschotter), vgl. /BRE 02/, sowie im Verband gemauertes Mauerwerk (z. B. Ziegelmauerwerk aus hartgebrannten Vollziegeln).

Für den Bentonit liegt eine erfolgreiche Erprobung und umfassende Informationen für den Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth vor. Er wird deshalb als Referenzmaterial gewählt /ENG 11a/.

In Bezug auf Salzbeton liegen für zwei Referenzrezepturen umfangreiche Kenntnisse vor: Salzbeton TYP Asse /ENG 11a/ sowie Salzbeton M2, der im ERAM eingesetzt wird /BFS 04a/. Sie unterscheiden sich in zwei wesentlichen Eigenschaften. Während der Salzbeton M2 ein hydraulisch förderbarer Salzbeton ist, der als selbstverdichtender Beton (SVB) klassifiziert werden kann, ist der Salzbeton Typ Asse nur bedingt hydraulisch förderbar und muss verdichtet werden. Der Salzbeton M2 zeigt allerdings ein maßgebliches autogenes Schwinden und neigt bei Verwendung als Massenbeton zu Rissbildung /MAU 07/, /MAU 12/. Der Salzbeton Typ Asse zeigt gemäß den Befunden am Asse-Vordamm kein solches Rissinventar und lässt auch aus theoretischen Gründen ein geringeres Schwinden erwarten (Anhang A), allerdings ließen die eingeschränkte Fließfähigkeit und die notwendige Verdichtung im Falle des Asse-Vordamms keine firstbündige Einbringung zu, Abb. 2.14 /BFS 10/, /EBE 09/. Bei einer Verwendung im Schacht stellt sich die Frage einer firstbündigen Verfüllung nicht, weiterhin sind eine Einbringung des Betons mittels Betonbombe und eine Verdichtung von einer oben angeordneten Arbeitsbühne aus möglich. Für die Verwendung im Schacht wird deshalb Salzbeton TYP ASSE als Referenzmaterial gewählt /ENG 11a/.

In Bezug auf Sorelbeton (MgO-Beton, Magnesiabinder) liegen für folgende Rezepturen umfangreiche Kenntnisse vor: Sorelbeton 29.6 A2, A1, MB 10. Der Sorelbeton 29.6 A2 und der Sorelbeton A1 wurden auf der Schachanlage Asse zum Bau von Pilotbarrieren (Prototypbauwerken) und Abdichtbauwerken (Strömungsbarrieren) eingesetzt /BFS 09/, /KAM 12/. Der Sorelbeton 29.6 A2 erwies sich aufgrund seiner geringeren Steifigkeit gegenüber dem A1 als weniger geeignet, während Sorelbeton A1, bei dem es sich um einen Beton mit Salzzuschlag handelt, und MB 10, bei dem es sich um einen Beton mit silikatischem Zuschlag handelt, relativ ähnliche Eigenschaften aufweisen und sich durch eine hohe Steifigkeit auszeichnen. Der MB 10 wurde im Projekt CARLA /KNO 05/, /KNO 10/ in Teutschenthal unter sehr schwierigen und für den Standort Gorleben nicht repräsentativen Lokationsbedingungen eingesetzt, während für den A1 Ergebnisse von Versuchsbauwerken aus dem ehemaligen Versuchsfeld im Tiefenaufschluss der Asse vorliegen. Während die generellen Standortbedingungen der Asse – altes, nahe der Salzstockflanke aufgefahrener Bergwerk – nicht repräsentativ für den Standort Gorleben sind, können die Lokationsbedingungen im Tiefenaufschluss Asse auf den Standort Gorleben und somit auch die Versuchsergebnisse übertragen werden. Aus dem Grund wird Sorelbeton der Rezeptur A1 als Referenzmaterial gewählt /ENG 11a/.



Abb. 2.14 Handverstopfen des Firstspaltes /EBE 09/, /GLÄ 05/

Bzgl. der Widerlagerelemente wird neben den tragfähigen Betonen auf setzungsstabile Schottersäulen aus Hartgesteinsschotter, wie sie im Rahmen des FuE-Projektes Schachtverschluss Salzdetfurth erprobt wurden und bei der Verfüllung der Schächte Salzdetfurth I und II abschließend zur Anwendung kamen, zurückgegriffen /MÜL 12a/.

Zur langzeitlichen Abdichtung wurde Salzgrus vorgesehen /MÜL 12a/, einmal als Versatzmaterial /BOL 11/ und weiterhin vorsorglich als künstlich verdichteter Salzgrus (Langzeitdichtung), wie er in der WIPP erprobt wurde /HUR 97/. Der Salzgrus wird in einer eigenständigen Materialspezifikation beschrieben /WIE 12/.

Wenn es möglich ist, aus den gewählten Referenzmaterialien ein den Anforderungen (gemäß Kapitel 2.2.1 – 2.2.3) genügendes Verschlussystem zu entwerfen, ist durch die Wahl großtechnisch bereits für den Einsatzzweck erfolgreich erprobter Materialien die Herstellbarkeit unter In-situ-Bedingungen im Salinar gesichert.

Weiterhin können auf Basis der veröffentlichten Ergebnisse zu den genannten Projekten die tatsächlich in situ erreichten Eigenschaften der Verschlüsse, insbesondere der hydraulischen Kenngröße „integrale Permeabilität“, angegeben werden. So ist mit Bezug auf die einleitend genannte frühzeitige Konkretisierung der hydraulischen Kenn-

größen mit der Angabe der „integralen Permeabilität“ eine erste Iteration möglich, die zeigen soll, ob die Erreichung der Zielsetzung des vollständigen/sicheren Einschlusses in Bezug auf den Lösungspfad prinzipiell möglich ist. Dazu werden hydraulische Langzeitberechnungen durchgeführt. Bei Zielerreichung stellen diese Entwurfsgrößen dann die Vorgaben (Prüfgrößen) für den Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren dar, vgl. Abb. 2.1.

3 Entwurf des Verschlusskonzeptes

Im FuE-Vorhaben ÜBERSICHT /EBE 09/ wurden für verschiedene Endlagerformationen und für verschiedene (geo)technische Barrieren die nachzuweisenden Funktionen und Eigenschaften zusammengestellt. Dazu ist anzumerken, dass den geotechnischen Barrieren die parallel angeordneten Elemente Baukörper, Kontaktzone und Auflockerungszone im umgebenden Salzgestein zugeordnet werden. Folgende übergeordnete Funktionen und Eigenschaften waren für alle Barrieren gleichermaßen nachzuweisen

- Herstellbarkeit⁷
- Dichtheit (= hydraulischer Widerstand)
- (Hydro-)Mechanische Widerstandsfähigkeit (~ Integrität)
- Beständigkeit (= Dauerhaftigkeit, Langzeitstabilität)

Die übergeordnet zu erfüllenden Funktionen und Eigenschaften werden auch für das zu entwerfende Verschlussystem als gültig angesehen, das, wie bereits in Kapitel 2.2.1 ausgeführt, aus den in Folge räumlicher Trennung und konstruktiver Diversität unabhängigen, redundanten Komponenten Schacht- und Streckenverschluss besteht. Dazu ist anzumerken, dass der Nachweis der Beständigkeit bei konventionellen Bauwerken i. d. R. konstruktiv (z. B. durch flüssigkeitsdichte, nichttragende Dichtschichten) geführt wird. Im Fall des Verschlussystems ist der Nachweis einer hinreichenden Beständigkeit aufgrund des langen Nachweiszeitraums Voraussetzung für Dichtheit und mechanische Widerstandsfähigkeit und ist somit vorrangig zu betrachten.

Mit Bezug auf die primäre Zielsetzung, den Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den endgelagerten Abfällen zu unterbinden, stellen die praktisch in unbegrenzter Menge vorhandenen Deckgebirgswässer, die aufgrund der hohen Lieferfähigkeit einiger Deckgebirgsschichten (Kapitel 2.1.3) hohe Druckaufbauraten bedingen und die bis zur Tagesoberfläche anstehen können, die maßgeblich zu beherrschende Einwirkung für das Verschlussystem dar. Begrenzte Lösungsmengen, die Salzstock-intern vorkommen /WOL 12/, sind dagegen im ersten Ansatz vernachlässig-

⁷ Durch existierende Pilotbauwerke gesichert.

bar. In Bezug auf Tages- und Deckgebirgswässer ist damit der Schachtverschluss der primäre und der Streckenverschluss der sekundäre, redundante Verschluss.

3.1 Schachtverschluss

In Bezug auf die lokationsspezifischen Randbedingungen wird Schacht Gorleben 1 als repräsentativ angenommen. Für den Schacht Gorleben 1 existiert bereits der geologische Aufschluss bis unterhalb der Einlagerungssohle, so dass dort der beste Kenntnisstand vorliegt. Weiterhin ist er Bestandteil des Schnittrisses Querschlag 1 West, der auch für die nicht erkundeten, potenziellen Einlagerungsbereiche als repräsentativ gilt und für die Endlagerauslegung genutzt wird. Die Wahl des Schachtes Gorleben 1 lässt somit eine Bewertung der thermomechanischen Auswirkungen des Endlagers auf die Schächte zu (siehe /MÜL 12c/). Auch ist Schacht Gorleben 1 als einziehender Wetter-schacht in der Betriebsphase prinzipiell höheren Temperaturwechselbeanspruchungen ausgesetzt, ein Sachverhalt, der in der Vergangenheit lokal zur Bildung horizontal orientierter Risse führte /HEU 08/. Die beim Entwurf des Schachtverschlusses zu beachtenden lokationsspezifischen Randbedingungen für den Schacht Gorleben 1 unterhalb des Salzspiegels sind in Abb. 3.1 dargestellt. Zum Zeitpunkt des Entwurfs des Schachtverschlusssystemes war keine Aussage bzgl. des Ausschlusses der Gorleben-Bank als potenzieller Lösungspfad (Bypass) verfügbar. Aus diesem Grund wurde vorsorglich überall dort, wo die Gorleben-Bank den Schacht 1 schneidet, planerisch ein Dichtelement angeordnet. Ist sie lediglich lokal aufgeschlossen, vgl. Abb. 3.1, wird aufgrund ihrer i. a. geringen hydraulischen Leitfähigkeit /HAM 12/ keine hydraulisch wirk-same Ankopplung an den Schacht angenommen.

Für den Schacht Gorleben 2 wird im Rahmen der VSG angenommen, dass ein bzgl. seiner Funktionserfüllung vergleichbares Schachtverschlusssystem wie im Schacht Gorleben 1 erstellt werden kann. Diese Annahme ist erforderlich, da aufgrund der et-was unterschiedlichen geologischen und geotechnischen Randbedingungen ein exakt baugleicher Schachtverschluss nicht zielführend ist. Allerdings sind die Randbedingun-gen so ähnlich, vgl. Abb. 2.4, dass von der Richtigkeit der Annahme ausgegangen werden kann.

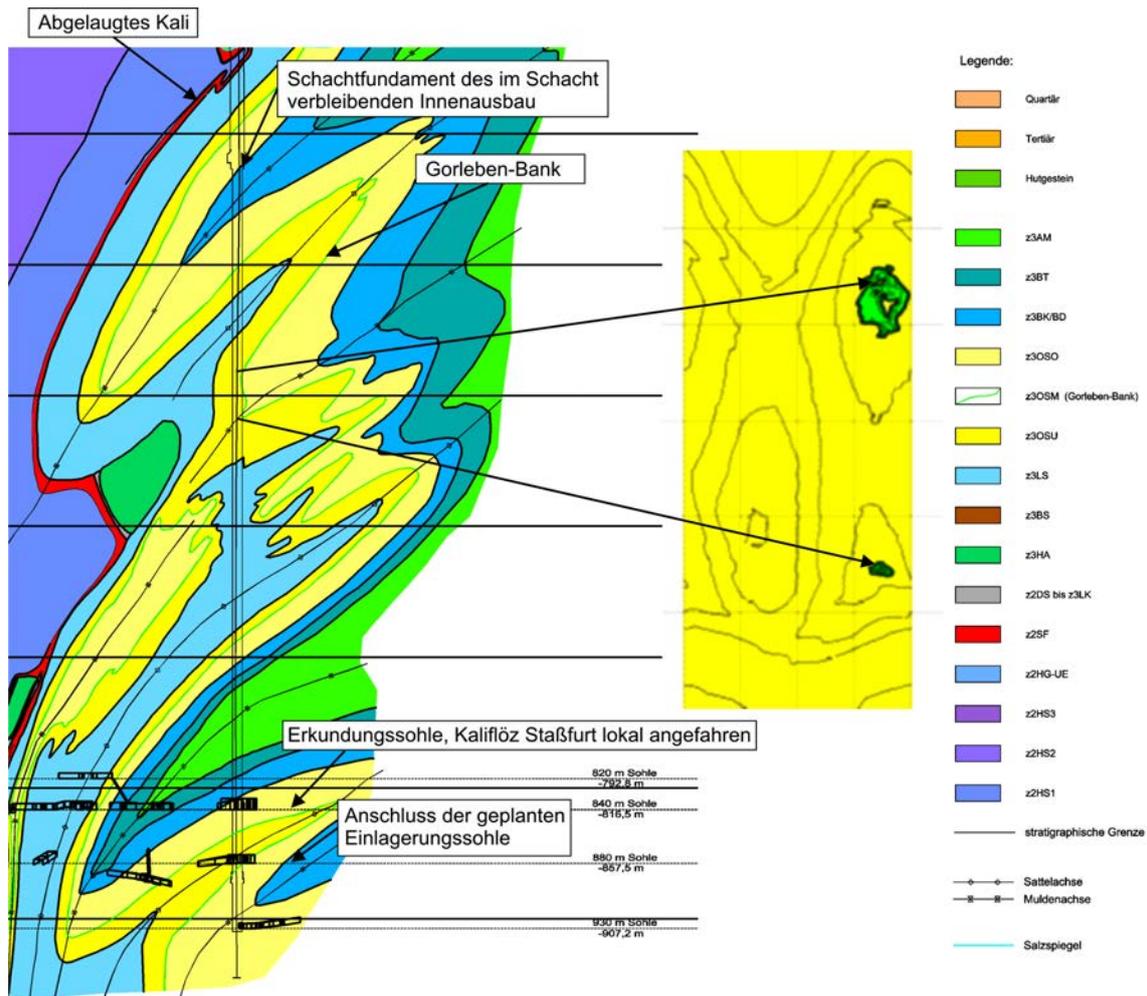


Abb. 3.1 Schacht Gorleben 1

Für den Entwurf des Schachtverschlusses wesentliche lokationsspezifische Randbedingungen (Schachtprofil, links) und vergrößert lokaler Aufschluss der Gorleben-Bank (Schachtabwicklung, rechts).

Der Entwurf der Dichtelemente basiert auf den in Kapitel 2.3 ausgewählten Referenzmaterialien Ca-Bentonit, Salzbeton TypASSE und Sorelbeton A1 /ENG 11a/. In Abb. 3.2 ist der Funktionsentwurf für den Schachtverschluss Gorleben 1 dargestellt.

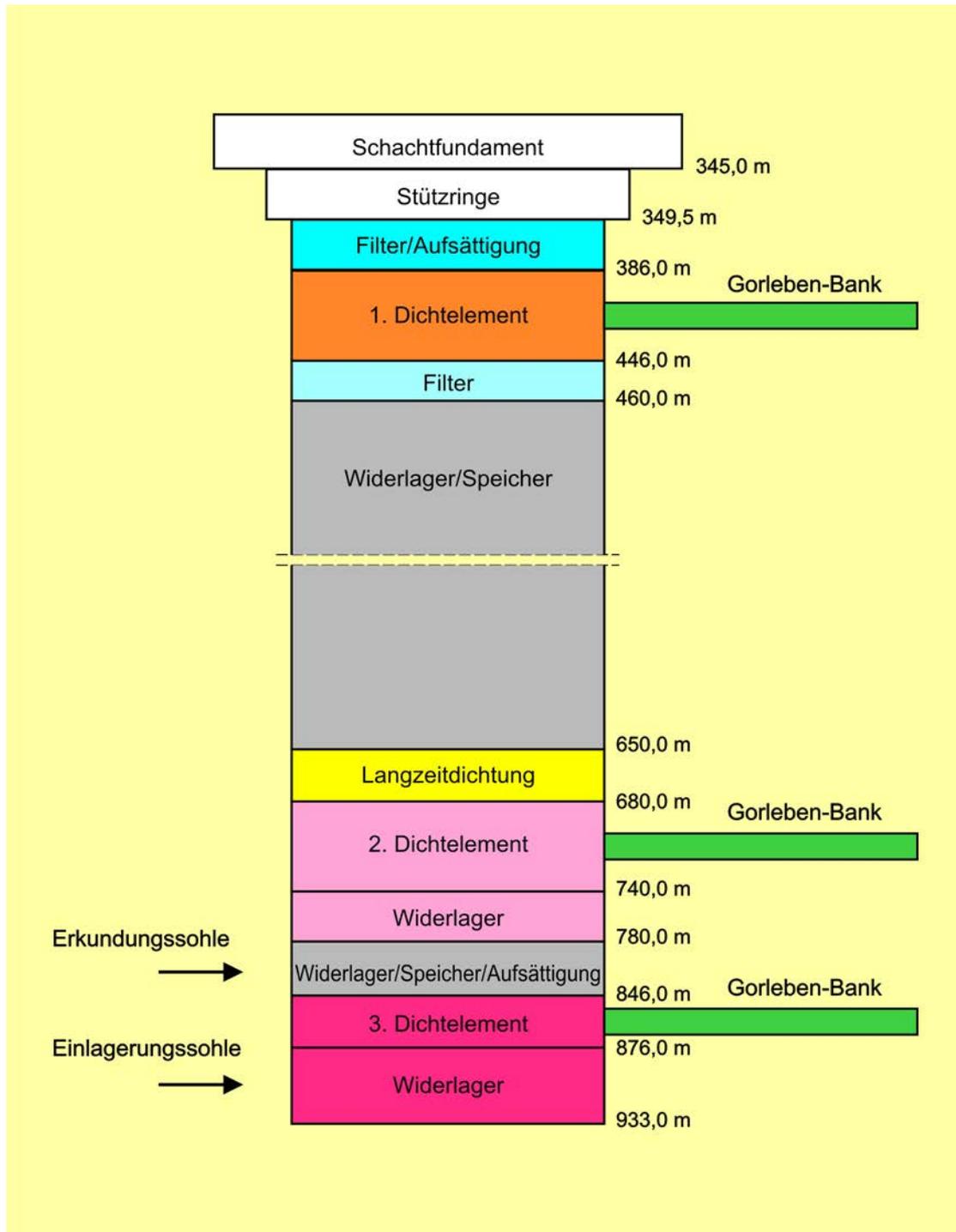


Abb. 3.2 Funktionsentwurf Schachtverschluss Gorleben 1

Die Wahl des Materials und die Anordnung der Dichtelemente begründen sich wie folgt:

1. Dichtelement: Bentonit

Begründung für die Materialwahl:

- (1) Bentonit ist den Salztönen ähnlich, die sich aufgrund natürlicher Ablagerungsprozesse mehrfach in der natürlichen Ausscheidungsfolge verschiedener Salzyklen finden (z. B. grauer oder roter Salzton). Grauer Salzton befindet sich oberhalb des Deckanhydrits von Schacht Gorleben 2. Damit ist nach /GRU 03/ die Langzeitstabilität des Bentonit im salinaren Milieu belegt.
- (2) Bentonit ist ein bei Salzlösungszutritt aktiv quellendes Material, das auch im Bereich geringer Teufenlagen und damit niedriger Teufendrücke günstig auf die nach dem Nachschnitt vorhandene Rest-Auflockerungszone im Salz auswirkt.
- (3) Bentonit hat eine hohe Ionenaustauschkapazität, so dass davon ausgegangen werden kann, dass bei zutretender Deckgebirgslösung organische Stoffe aus dem Deckgebirge ausgefiltert werden.

Begründung für die Position:

Wie bereits ausgeführt, ist die Lage der Gorleben-Bank maßgebend. Weiterhin erfolgt die Aufsättigung möglicherweise untersättigter Salzlösungen „von oben“ durch das oberhalb des Bentonitdichtelementes und unterhalb des Schachtfundamentes zur Verfügung stehende Salz.

Sonstiges:

Bentonit ist nicht eigentragfähig und benötigt ein Widerlager sowie aufgrund seiner Eigenschaft als feinkörniger Erdstoff Filterschichten zur Vermeidung von Erosion und Suffosion.

2. Dichtelement: Salzbeton

Begründung für die Materialwahl:

- (1) Bei den Deckgebirgswässern handelt es sich überwiegend um Wässer geringer Salinität und mit geringem Betonangriffsgrad (Expositionsklasse XA1). Eine Ausnahme stellen die salzspiegelnahen, stark salinen und gesättigten Salzlö-

sungen dar, insbesondere die Hutgesteinslösungen (vgl. Kapitel 2.1.3) /KLI 11/. Für letztere gilt, dass durch den Verbleib des wasserdichten Ausbaus, der erhebliche Mengen an Stahlbeton enthält, nicht nur im Deckgebirge, sondern auch unterhalb des Salzspiegels bis zum Schachtfundament ein erheblicher Puffer für $MgCl_2$ und $MgSO_4$ vorhanden ist. Eine $MgCl_2$ Aufsättigung in Folge des Aufschlusses des Kaliflözes Staßfurt oberhalb des Schachtfundamentes (Abb. 3.1) kann ausgeschlossen werden, da das Kaliflöz bereits abgelautet ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die deckgebirgsseitig vor dem Bentonitdichtelement in praktisch unbegrenzter Menge anstehende Salzlösung an NaCl gesättigt, aber eher arm an Magnesium und Sulfaten ist. Für diese Lösungszusammensetzungen ist zementgebundener Salzbeton ein dauerhaftes bzw. langzeitstabiles Material /MEY 03/.

- (2) Ein kohäsiv mit der Schachtkontur verbundenes Dichtelement aus Salzbeton kann auch Widerlagerfunktion ausüben; es treten keine Setzungen auf.
- (3) Aufgrund seiner Dichtheit ein diversitäres Material zum Bentonit, allerdings ohne Quellvermögen

Begründung für die Position:

Maßgeblich ist die Lage der Gorleben-Bank. Weiterhin ist Salzbeton kein aktiv quellendes Material. Um das Aufkriechen des umgebenden Salzes zu beschleunigen, ist eine möglichst tiefe Lage des Salzbetondichtelementes von Vorteil, da im Schacht mit zunehmender Teufe die Spannungsverhältnisse dazu führen, dass die Kriechgeschwindigkeit des Salzes ansteigt.

3. Dichtelement: Sorelbeton

Begründung für die Materialwahl:

- (1) Im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle ist lokal das Kaliflöz Staßfurt mit Carnallitit als Hauptkomponente aufgeschlossen. Deshalb ist bei einem Lösungszutritt durch die höhere Löslichkeit von $MgCl_2$ im Vergleich zum NaCl von einer Magnesiumanreicherung auszugehen. In Bezug auf $MgCl_2$ -reiche Lösung

ist Sorelbeton dauerhaft und die 3-1-8 Phase sogar langzeitstabil⁸. Deshalb wird das Dichtelement unterhalb der Erkundungssohle aus Sorelbeton erstellt (siehe dazu /XIE 12/).

- (2) Ein kohäsiv mit der Schachtkontur verbundenes Dichtelement aus Sorelbeton kann auch Widerlagerfunktion ausüben, es treten keine Setzungen auf.
- (3) Diversitäres Material zum Bentonit und Salzbeton.

Begründung für die Position:

Trennung von Erkundungs- und Einlagerungssohle und wiederum die Lage der Gorleben-Bank.

Langzeitdichtung: angefeuchteter, künstlich verdichteter Salzgrus (ca. 1,5 Ma% NaCl-Lösung)⁹

Begründung für die Materialwahl:

- (1) Sollte es, z. B. im Rahmen weniger wahrscheinlicher Szenarien, langfristig zum Auspressen von Salzlösungen aus dem Einlagerungs- oder Erkundungsbereich kommen, sind $MgCl_2$ -reiche Lösungen zu erwarten, die in Kontakt mit dem zementgebundenen Salzbeton treten. Der Salzbeton beginnt dann zu korrodieren und verliert allmählich (sehr langsam) seine dichtenden Eigenschaften. Für das Eintreten eines solchen Falles wird vorsorglich ein Dichtelement aus Salzgrus angeordnet, von dem angenommen wird, dass es bis zum Eintreten eines solchen Zeitpunktes so weit kompaktiert ist, dass es das Dichtelement aus zementgebundenem Salzbeton ersetzt.

Begründung für die Position:

- (1) Oberhalb des Salzbetondichtelementes, da ein setzungsarmes Widerlager zum Einbringen des angefeuchteten Salzgruses von Vorteil ist.

⁸ Die Stabilität der Sorelbetone ist derzeit Gegenstand der Forschung. Üblicherweise wird die 5-1-8 Phase gebildet. Sie ist metastabil und wandelt sich bei Zutritt $MgCl_2$ -reicher Lösungen unter Quellen in die langzeitstabile 3-1-8 Phase um.

⁹ Ziel der Anfeuchtung ist die optimale Verdichtung. Eine Messkurve für 1,2 Ma% Feuchte (ungefähr 1,5 Ma% NaCl-Lösung) steht zur Verfügung /MÜL 12a/. Ggf. ist der Feuchtgehalt noch geringfügig zu erhöhen (z. B. auf 2 Ma% nach /HUR 97/).

- (2) Ein mit Salzgrus verfüllter Hohlraum stellt in Bezug auf hydraulische Langzeitbetrachtungen ein kompaktierbares Volumen dar, so dass die Konvergenz als Antrieb für die Druckerhöhung der Porenlösung nicht vernachlässigt werden kann. Kompaktierbares Volumen sollte deshalb einerseits unter so hohem Teufendruck stehen, dass möglichst vor Lösungszutritt seine Kompaktion weitgehend abgeschlossen ist. Andererseits sollte der Teufendruck deutlich unterhalb des Teufendrucks der Einlagerungssohle liegen und das kompaktierbare Volumen möglichst weit vom Einlagerungsbereich entfernt sein, so dass ein Einpressen von Salzlösung aus dem kompaktierbaren Volumen in den Einlagerungsbereich aufgrund des erforderlichen Druckes und Volumens in den Einlagerungsbereich nicht erfolgt, sondern ein Abpressen ggf. zugetretener (nicht kontaminierter) Deckgebirgslösungen in die Richtung des geringeren hydraulischen Widerstandes (Schotter und Bentonit)¹⁰.
- (3) Bei Korrosion der Zementphasen des Salzbetondichtelements erfolgt ein allmähliches Zusammenwachsen von Langzeitdichtung und dem verbleibenden, nicht korrodierenden Salzzuschlag des Salzbetondichtelementes.

Sonstiges:

Feuchter Salzgrus mit einer Porosität < 20 % ist bereits so verfestigt, dass er nicht mehr die Eigenschaften eines Schüttgutes, sondern eines kohäsiven Baustoffes aufweist /SCH 04/. In diesem Zustand kann davon ausgegangen werden, dass der verdichtete Salzgrus sein Eigengewicht über die Schachtkontur abträgt.

Für den Entwurf der Widerlagerelemente stehen die Materialien Salzbeton Typ Asse und Sorelbeton A1 sowie Hartgesteinsschotter zur Verfügung, vgl. Kapitel 2.3. Während die Betone kohäsiv mit der Schachtkontur verbunden und setzungsfrei sind, weisen Lockergesteine wie Schotter, Splitt, Kies und Sand Setzungen auf. Dementsprechend sind die Dichtelemente aus Beton durch Widerlager aus den jeweils gleichen Betonen zu halten, da sonst in den Dichtelementen Rissbildungen auftreten können, wenn sich die Lockergesteine aufgrund ihres Verformungsverhaltens und ihrer geringeren Steifigkeit der Tragfunktion entziehen. Allerdings haben die genannten Lockergesteine eine Porenraumstruktur, die nachweislich zugänglich ist, und üben deshalb ne-

¹⁰ Anmerkung: Im Schotter wird lange Zeit nur geringer Lösungsdruck erwartet.

ben der Widerlagerfunktion auch gleichzeitig Speicherfunktion (Porenspeicher) aus. Speichervolumina haben verzögernde Wirkung und bei vertikaler Anordnung schwerkraftbedingt gleichzeitig druckreduzierende Wirkung, so dass Kanalisierungseffekte auf diese Weise konstruktiv vermieden werden. Weiterhin besteht in den Speichervolumina lange Zeit oben ein Luftpolster, das die Materialien der Dichtelemente von dem Kontakt mit Lösungen von unterhalb trennt. So kann eine gegenseitige Beeinflussung der Materialien durch Korrosion oder Alteration für die Zeitphase, bis das Speichervolumen aufgefüllt ist, ausgeschlossen werden.

Aus diesem Grund werden den Betondichtelementen jeweils Widerlager aus dem gleichen Beton zugeordnet und zwischen den unterschiedlichen Materialien Speicherelemente angeordnet, die auch Widerlagerfunktion ausüben. Das 1. Dichtelement aus Bentonit wird dabei von Filtern aus Sanden, Kiesen und ggf. Splitt umschlossen, um die Filterstabilität zu gewährleisten, wobei das Filterelement oberhalb des Bentonitdichtelementes gleichzeitig – wie bereits erwähnt – die Aufsättigung möglicherweise an Salz untersättigter Salzlösungen „von oben“ sicherstellt, da im Bereich des Filterelementes die Zugänglichkeit zu Salzkontur gegeben ist. Bei dem von Filtern umschlossenen Bentonitdichtelement handelt es sich dabei um die Konstruktion, die sich im Rahmen des Schachtverschlusses Salzdetfurth bewährt hat.

Wie bereits erwähnt, ist auf der Erkundungssohle (im Infrastrukturbereich sowie den Zugangsstrecken) Carnallit aufgeschlossen, so dass von einer $MgCl_2$ -Aufsättigung ausgegangen werden muss. Da der Umfang der „natürlichen“ Aufsättigung nicht quantifiziert werden kann, wird in den Infrastrukturbereich zusätzlich technischer Bischofit eingebracht, um eine Aufsättigung der zutretenden Salzlösungen bis zur Sorelbetonstabilität sicherzustellen.

Damit sind alle in Abb. 3.2 angegebenen Funktionselemente des Schachtverschlusses erläutert sowie ihre Teufenlagen angegeben. Die genaue Angabe der Materialzuordnung sowie ihre jeweilige Dicke finden sich in Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Zusammenstellung der Funktionselemente im Salinarteil des Schachtverschlusses Gorleben 1 und ihre Materialspezifikation und Dicke /MÜL 12a/

Funktionselement	Material	Spezifikation	Dicke	Teufe OK
Filter/Aufsättigung	Basaltsplitt, Kies, Sand	/MÜL 12a/	36,5 m	349,5 m
1. Dichtelement	Bentonit	Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth /ENG 11a/	60* m	386,0 m
Filter	Splitt, Kies, Sand	/MÜL 12a/	14 m	446,0 m
Widerlager/ Speicher	Basaltschotter	/MÜL 12a/	190** m	460,0 m
Langzeitdichtung***	angefeuchteter Salzgrus	/MÜL 12a/, /WIE 12/	30 m	650,0 m
2. Dichtelement	Salzbeton	Salzbeton Typ Asse /ENG 11a/	60* m	680,0 m
Widerlager	Salzbeton	Salzbeton TYP ASSE /ENG 11a/, /MÜL 12a/	40 m	740,0 m
Widerlager/ Speicher/ Aufsättigung	Basalt-/ Serpentinitschotter/ technischer Bischofit	/MÜL 12a/	66 m	780,0 m
3. Dichtelement	Sorelbeton	Sorelbeton A1 /ENG 11a/	30* m	846,0 m
Widerlager	Sorelbeton	Sorelbeton A1 /ENG 11a/, /MÜL 12a/	57 m	876,0 m

* Annahme: mittlere 10 m nicht wirksam wegen Gorleben-Bank

** Annahme: Gorleben-Bank in diesem Bereich hydraulisch nicht wirksam angeschlossen, da nur geringfügig angeschnitten (Abb. 3.1, rechts)

*** Funktionsfähigkeit erst nach hinreichender Salzgruskompaktion gegeben, deshalb die Bezeichnung „Langzeitdichtung“

Die Dicken der Dichtelemente sind, sofern ausreichend Platz vorhanden ist, in Anlehnung an die Endlagerprojekte Opalinuston /NAG 02/ und Stilllegung ERAM /BFS 04b/, für die Langzeitsicherheitsanalysen vorgenommen wurden, gewählt. So beträgt die Dicke des Bentonitdichtelementes im Schweizer Schachtverschlusskonzept ca. 40 m /NAG 02/ und im Schachtverschlusskonzept ERAM ca. 60 m /BFS 04b/. Die Summe der Dicken der Dichtelemente aus Salzbeton orientiert sich an der Länge der Streckenabdichtungen im ERAM von 26 m, für die im Zeitraum von 25.000 Jahren ein korrosionsbedingter Durchbruch von MgCl₂-reichen Salzlösungen nicht zu erwarten ist /MEY 03/. Um einen Zeitraum von 50.000 Jahren abzudecken (vgl. Kapitel 2.2.2) wur-

de die wirksame Länge auf 50 m vergrößert, d. h. in etwa verdoppelt. Die Dicke des Sorelbetondichteelementes ist durch die gegebenen geologischen und bergbaulichen Randbedingungen auf 30 m beschränkt. Die Dicke der Langzeitdichtung wurde in Anlehnung an den Mindestabstand ohne Sicherheitszuschlag zwischen Richtstrecke und Anhydrit im Einlagerungsbereich zu 30 m gewählt, um nach vollständiger Salzgruskompaktion im Schacht eine den Sicherheitsabständen vergleichbare Dicke der Salzbarriere zu erhalten.

Zumindest im Bereich des 1., 2. und 3. Dichtelementes wird die Schachtkontur nachgeschnitten, siehe Kapitel 2.2.3. Als integrale Lösungspermeabilität kann auf Grundlage der vorliegenden Befunde im Bereich des Bentonitdichteelementes bezogen auf den nachgeschnittenen Querschnitt ein Anfangswert von $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ angesetzt werden, im Bereich des Salzbetondichteelementes $7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ und im Bereich des Sorelbetondichteelementes ein Wert von $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ /ENG 11a/. Es handelt sich um Anfangswerte, die als best estimates auf Grundlage von in situ Messwerten an Barrierebauwerken abgeleitet wurden.

Oberhalb der in Abb. 3.2 angegebenen Funktionselemente hat die Schachtverfüllung keine Verschlussfunktion mehr. Damit hat auch der Verbleib der wasserdichten Ausbauten im Deckgebirge keinen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der geotechnischen Barrieren. Die Verfüllung wird an die natürliche Schichtfolge des Deckgebirges angepasst, um die Grundwasserstockwerke und die damit verbundenen hydraulischen Gradienten langfristig so wenig wie möglich zu verändern, obwohl der wasserdichte Ausbau im Schacht verbleibt. Oberhalb der oberen Filterschicht in 349,5 m Teufe wird bis in das Niveau des Salzspiegels verdichteter, angefeuchteter Salzgrus (Haldensalz) eingebracht, darüber verschiedene an die jeweiligen Grundwasserleiter und -geringleiter und ihre hydraulische Leitfähigkeit angepasste Mineralgemische.

3.2 Streckenverschlüsse

Die Streckenverschlüsse werden aus Gründen der Langzeitstabilität analog zum 3. Dichtelement des Schachtverschlusses ebenfalls aus Sorelbeton A1 hergestellt. Die Konstruktion der Streckenverschlüsse lehnt sich an die bereits umgesetzte Konstruktion der Strömungsbarrieren (Abdichtbauwerke) in der Schachtanlage Asse II an. Abb. 3.3 zeigt die Strömungsbarriere SB-775-1, einen in der Schachtanlage Asse II realisierten Streckenverschluss. Als integrale Permeabilität für den nachgeschnittenen Quer-

schnitt wird analog zu den Sorelbetondichteelementen im Schacht eine integrale Permeabilität von $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ angesetzt.

Gemäß den Planungen zur Stilllegung des Endlagerbergwerkes /BOL 11/, /HER 12/ besteht jeder vorgesehene Streckenverschluss aus zwei jeweils 50 m langen Dichteelementen aus Sorelbeton A1, die zwischen Widerlagern eingebracht werden. Die Widerlager werden ebenfalls aus Sorelbeton A1 hergestellt und sind zwischen 0,75 m dicken Schalungsmauern angeordnet, vgl. Abb. 3.4 als Prinzipdarstellung. Die Schalungsmauern werden vorzugsweise aus Mauerziegeln errichtet, aber auch die Verwendung von Kalksandsteinen ist aus bautechnischer Sicht möglich. Sie können den Druck der Betonsuspension bei lagenweiser Betonage des Widerlagers ausreichend zuverlässig bei vernachlässigbaren Verschiebungen aufnehmen. Prinzipiell sind auch Salzbriketts zur Herstellung der Schalungsmauern geeignet.

Die Betonage des jeweiligen Dichtelementes erfolgt über Firstbohrungen $\varnothing 200 \text{ mm}$. Dazu werden 2 Bohrungen gestoßen, eine Bohrung dient als planmäßige Verfüllbohrung und eine Bohrung als Entlüftungs- bzw. Reservebohrung, um einen unterbrechungsfreien Verfüllprozess sicherzustellen (vgl. Abb. 3.4). Im mittleren Bereich des Dichtelementes wird deshalb ein firsthöchster Punkt hergestellt, bei dessen Herstellung der Fließwinkel des Sorelbeton A1 berücksichtigt wird. Er beträgt im Mittel etwa $1,2^\circ$ /HMG 08/. Der mittlere Wert sollte als Neigung der Streckenfirste nicht unterschritten werden um Lufteinschlüsse zu vermeiden. Als Planwert wird eine Neigung von $1,5^\circ$ empfohlen, Lufteinschlüsse durch lokal größere Fließwinkel werden durch Betonage unter Druck vermieden. Da das Ausbreitverhalten von Sorelbeton bei der Betonage bis etwa 25 m gesichert ist /HMG 08/, ergibt sich daraus die Länge der Einzelemente von 50 m. Die Verfüllbohrungen werden aus einem Streckenstummel mit Überhauen (vertikal nach oben ausgerichteter Hohlraum) gestoßen, wobei das Überhauen nicht zur Erkundungssohle durchschlägig ist. Die Betonage der Widerlager erfolgt nicht über Bohrungen, sondern ausgehend von firsthöchsten Punkten der jeweiligen Luftseite, wobei bei Notwendigkeit ein Betonierschlauch verwendet wird, um Entmischungen der Sorelbetonsuspension zu verhindern.

Im Bereich der Dichtelemente wird die Strecke nachgeschnitten. Die erforderliche Nachschnitttiefe im Bereich der Dichtelemente wird im Rahmen der hier durchgeführ-

ten Prognose rechnerisch¹¹ ermittelt (siehe /MÜL 12c/). Die ermittelten Profile stellen die Mindestnachschnittprofile dar. Das tatsächliche Nachschnittprofil enthält einen ca. 3 m breiten geraden Abschnitt in der Sohle, der für den Fahrlader bestimmt ist, der das Haufwerk aus dem Nachschnitt aufnimmt.

Da die Streckenverschlüsse technisch die sekundären, redundanten Verschlüsse sind, lassen sich für sie – sieht man von den Lösungszusammensetzungen ab – nicht in gleicher Weise die entscheidenden (auslegungsbestimmenden) Einwirkungen festlegen wie für den Schachtverschluss, obwohl die Zielsetzung des Entwurfs bestehen bleibt, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu verhindern. Die Einwirkung Lösungsdruck bis zur Tagesoberfläche ist auf jeden Fall zu betrachten, allerdings ist der Zeitpunkt des Auftretens des maximalen Lösungsdruckes bzw. die Druckaufbaurrate noch zu ermitteln (siehe /MÜL 12c/). Weiterhin stellt sich möglicherweise einlagerungsseitig ein Gasdruck ein, der ggf. die auslegungsbestimmende Einwirkung darstellt. Auch für den Gasdruck ist der Maximalwert, der Zeitpunkt seines Auftretens sowie die Druckaufbaurrate zu bestimmen /KOC 12/.

3.3 Dichtpfropfen

Die aus Sorelbeton erstellten Dichtpfropfen werden angeordnet, um trockenen und feuchten Salzgrusversatz voneinander zu trennen. An sie bestehen keine Anforderungen; sie werden deshalb auch nicht ausgelegt, sondern konstruktiv gewählt. Ihre Konstruktion entspricht den Widerlagern der Streckenverschlüsse. Bei Bedarf wird der Bereich der Dichtpfropfen nachgeschnitten. Aufgrund der kurzen Länge der Dichtpfropfen von 10 m kann die Betonage ausgehend von einem firsthöchsten Punkt von der Luftseite aus erfolgen.

Aus betrieblicher Sicht repräsentieren die Dichtpfropfen das Abwerfen der befüllten Einlagerungsfelder.

¹¹ Vor Einbau eines Dichtelementes wird die Prognose zum Nachschnitt durch geotechnische Messungen im Bereich der Abdichtlokation überprüft und ggf. angepasst.

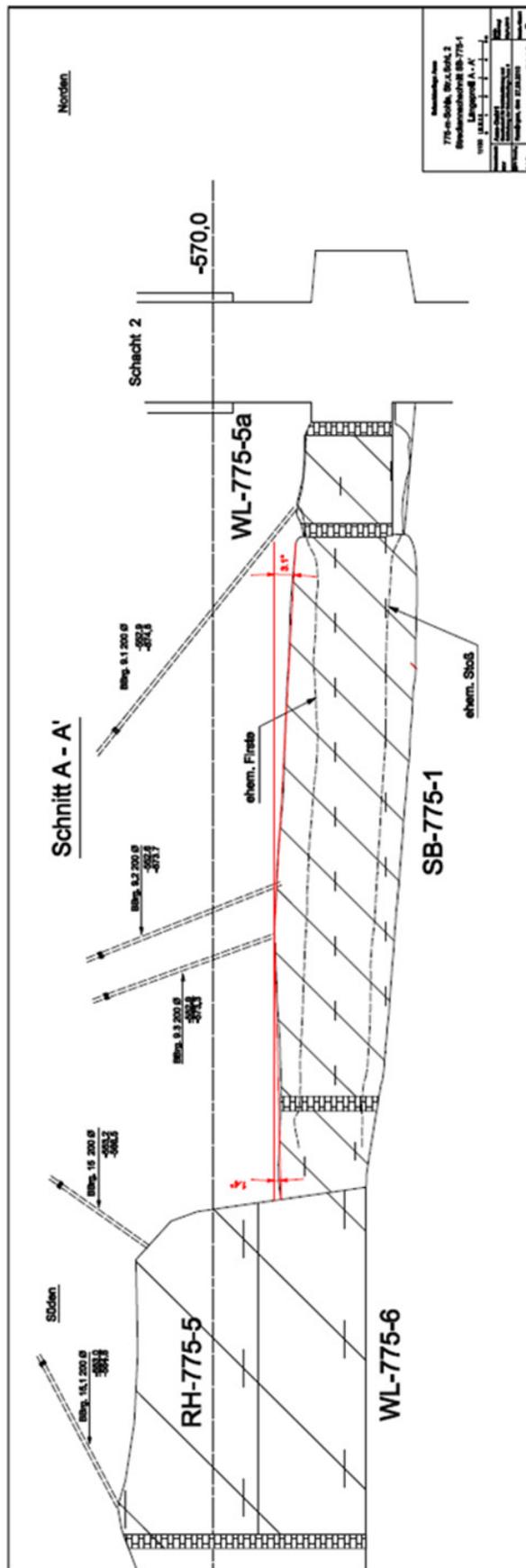


Abb. 3.3 Darstellung eines realisierten Streckenverschlusses (SB-775-1) /TEC 10/

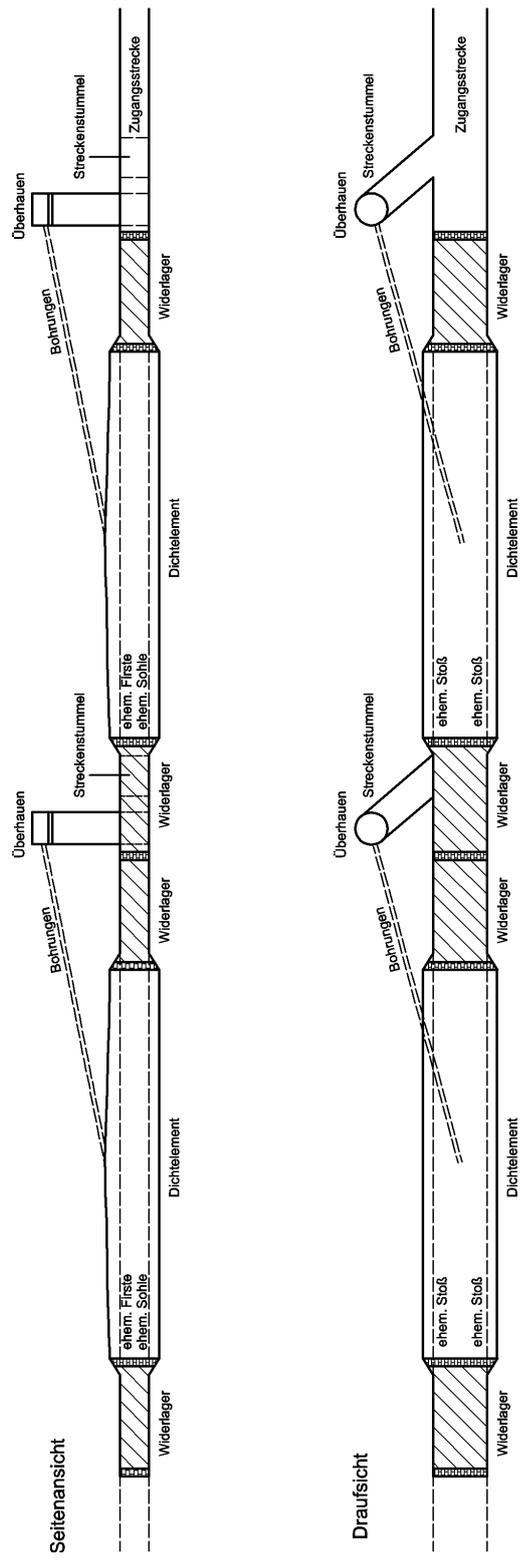


Abb. 3.4 Konstruktive Gestaltung der Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord /HER 12/

4 Bautechnische Auslegung des Verschlusssystems – technischer Funktionsnachweis

4.1 Methodische Grundlagen

Die Auslegung des Verschlusssystems erfolgt in Anlehnung an die technischen Regelwerke /CEN 09/, /CEN 10/, /GDA 97/, /DAF 04/ die darauf abzielen, das nachfolgend näher erläuterte anforderungsgemäße Zuverlässigkeitsniveau von (Barriere-) Bauwerken nachzuweisen. Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Bauwerken ist die Anwendung verschiedener theoretischer Verfahren – z. B. probabilistischer Verfahren – zulässig /CEN 10/. In der Baupraxis wird für die Bemessung das Konzept der Grenzzustände in Verbindung mit der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte angewendet. Der hinter diesem Konzept stehende baupraktische Ansatz ist, das Verhalten eines Bauwerks durch Gleichgewichtszustände zu beschreiben. Als Folge auf ein Ereignis, z. B. das Aufbringen einer Last, stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein, Prozesse werden als eine Folge von Gleichgewichtszuständen behandelt.

Bei Anwendung des Konzeptes der Grenzzustände wird die Größe von Einwirkungen, die die Funktionsfähigkeit eines Bauwerkes gefährden, mit der Größe von Widerständen, die das Bauwerk gegenüber den Einwirkungen aufweist, verglichen und dann gefordert, dass die Widerstände größer sind als die Einwirkungen. Dabei sind Einwirkungen und Widerstände in Bezug auf einen Grenzzustand anzugeben. Der Grenzzustand ist der Zustand des Bauwerks, bei dessen Überschreiten die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt sind. Für Barrierebauwerke können integritätsverletzende Grenzzustände¹² wie Rissbildung oder Auflockerung z. B. beschrieben werden durch das Erreichen von

- Grenzfestigkeiten (z. B. materialspezifische Bruch- und Dilatanzfestigkeit)
- Grenzverformungen (z. B. Volumen- und Scherverformungen)
- Grenzspannungen (z. B. Fluidruckkriterium)

¹² Analog zur geologischen Barriere /EBE 09/, /MÜL 99/

Die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte besteht dann darin, dass sowohl die Einwirkungen als auch die Widerstände mit Teilsicherheitsbeiwerten versehen werden, mit denen Ungewissheiten wie z. B. ungünstige Abweichungen von repräsentativen Werten und Ungenauigkeiten in der Modellbildung abgedeckt werden.

So ist formal die Beziehung

$$E_d \leq R_d \quad (4.1)$$

zu erfüllen, wobei mit E_d der Bemessungswert der Beanspruchung aus Einwirkungen und R_d der Bemessungswiderstand aus Widerständen bezeichnet wird. Die Bemessungswerte ergeben sich aus der Kombination der charakteristischen Werte von Einwirkungen und Widerständen als repräsentative Werte mit den jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerten beispielhaft zu

$$E_d (\gamma_F \cdot F_k, a_d \dots) \leq R_d (X_k / \gamma_M, a_d \dots) \quad (4.2)$$

Bemessungswerte der Beanspruchung E_d sind beispielsweise Spannungen oder Verformungen. Sie werden i. d. R. mit Hilfe geeigneter Berechnungsvorschriften (Berechnungsmodelle) unter Berücksichtigung von

- charakteristischen Einwirkungen F_k (z. B. repräsentative Werte für Lasten),
- Nennwerten geometrischer Größen a_d (z. B. Längen- und Querschnittsabmessungen),
- etc.

ermittelt und mit einem Teilsicherheitsbeiwert γ_F für die Einwirkungen versehen. Auf einen Teilsicherheitsbeiwert für die geometrischen Größen kann in den Fällen verzichtet werden, in denen diese genau bekannt sind. Bemessungswiderstände R_d werden anhand

- charakteristischer Werte X_k für Bauteilwiderstände,
- Nennwerten geometrischer Größen a_d ,
- etc.

ermittelt und durch einen Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Materialeigenschaften abgemindert. Beispiele für Bauteilwiderstände sind

- charakteristische Werte der Festigkeit,
- charakteristische Werte der Steifigkeit,
- charakteristische Eindringtiefe von Flüssigkeiten (= hydraulischer Widerstand bei Kurzzeitbeaufschlagung),

wobei anzumerken ist, dass Bauteilwiderstände Funktionen günstig wirkender Einwirkungen sein können (z. B. Scherfestigkeit als Funktion der Normalspannung).

Die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte erlaubt die Kombination deterministisch und probabilistisch ermittelter Größen innerhalb eines einzelnen Nachweises, ein Sachverhalt der für die methodische Weiterentwicklung des technischen Nachweiskonzeptes bzw. der Nachweisführung in der Baupraxis von großer Bedeutung ist. So werden z. B. Ungenauigkeiten des deterministisch abgeleiteten Modells für die Belastung mit Hilfe eines Teilsicherheitsbeiwertes abgedeckt, für die repräsentativen Materialkennwerte, die auf Basis statistischer Methoden ermittelt werden, kommt ein unabhängiger Teilsicherheitsbeiwert zur Anwendung.

Die Analyse der Grenzzustände erfolgt eingebettet in Bemessungssituationen. /CEN 10/ unterscheidet vier typische Bemessungssituationen (siehe Tab. 4.1), die durch charakteristische Merkmale bestimmt sind, die das Zuverlässigkeitsniveau beeinflussen. Dazu ist anzumerken, dass bei Barrierebauwerken, deren Versagen eine Gefahr für Leben und Gesundheit darstellen kann, die Nachweisführungen ein Zuverlässigkeitsniveau aufweisen sollen, das üblicherweise Tragfähigkeitsnachweisen zugeordnet wird /KID 97/. Dieser Sachverhalt ist bei Zuordnung der Bemessungssituation gemäß Tab. 4.1 berücksichtigt.

Tab. 4.1 Bemessungssituationen und charakteristische Merkmale

Bemessungssituation	Merkmal
Vorübergehende Situationen*	Zeitlich begrenzte, übliche Situationen, z. B. Bauzustände
Ständige Situationen*	Übliche Situationen, die normalen Funktions- und Nutzungsbedingungen entsprechen
Außergewöhnliche Situationen**	Selten auftretende, meist außerplanmäßige Situationen, z. B. Unfallsituationen wie Anprall oder Explosion
Situationen bei Erdbeben***	Zeitlich extrem kurz, auslegungsbestimmende Erdbeben selten

* treten ein

** treten wahrscheinlich nicht ein

*** regional bedingt unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeit

Die Einstufung in Bemessungssituationen bestimmt die zu betrachtenden Einwirkungskombinationen, d. h., welche Einwirkungen im Rahmen einer Bemessungssituation gleichzeitig zusammen auftreten können, und die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte. So werden z. B. die Einwirkungen zweier unabhängiger Unfallsituationen nicht miteinander kombiniert. Auf diese Weise wird die Eintrittswahrscheinlichkeit im Sinne der Gewährleistung eines einheitlichen Zuverlässigkeitsniveaus berücksichtigt.

Da das Verschlussystem in Anlehnung an das technische Regelwerk auszulegen ist, sind seine Grenzzustände zu bestimmen, die zu betrachtenden Einwirkungen und Einwirkungskombinationen sowie die Widerstände zu ermitteln. Weiterhin sind den Grenzzustandsuntersuchungen Bemessungssituationen zuzuordnen.

4.2 Einwirkungen

Für den technischen Funktionsnachweis werden die Einwirkungen klassifiziert /GDA 97/, /DAF 04/ und in Anlehnung an /BFS 04c/ wie folgt konkretisiert sowie um den Aspekt der thermischen Einwirkungen – bedingt durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle – ergänzt:

Chemische Einwirkungen

- Chemischer Angriff durch Lösungen und Gase, deren Zusammensetzung noch zu spezifizieren ist.

- Durch Temperaturänderungen ausgelöste chemische Einwirkungen (z. B. Löslichkeitsänderungen).

Mechanische Einwirkungen¹³

- Einwirkungen aus Kräften und Spannungen
 - Eigengewicht
 - Gebirgsdruck
 - Fluiddruck
 - Strömungskräfte
 - Zwangsspannungen (z. B. aus Steifigkeitsdifferenzen)
- Einwirkungen aus eingprägten Verzerrungen
 - Temperaturänderungen/-differenzen in Verbindung mit thermischer Expansion/Kontraktion
 - Quellen/Schwinden
 - Kriechen/Relaxation
 - Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrundwechselwirkungen (z. B. Verformungsbehinderungen, Setzungen)

Biologische Einwirkungen (z. B. Bakterien, Pilze) werden aufgrund der Wahl anorganischer Referenzmaterialien (Tab. 3.1) nicht betrachtet. Thermische und hydraulische Einwirkungen sind in den chemischen und mechanischen Einwirkungen indirekt erfasst.

Die Widerstände sind material- und konstruktionsspezifisch und werden im Rahmen der Grenzzustandsbetrachtungen präzisiert.

¹³ Spannungen und Verzerrungen sind über konstitutive Beziehungen miteinander verknüpft. Sie werden deshalb beide den mechanischen Einwirkungen zugeordnet.

Im Falle des ERAM wurden die Bemessungssituationen der geotechnischen Barrieren (Ausnahme Bauzustände) durch die Bemessungssituationen des Endlagers festgelegt¹⁴. Diese Vorgehensweise ist im ersten Ansatz plausibel, da die Szenarienanalyse wahrscheinliche Szenarien für das Endlager enthält, aus denen sich übliche Situationen für die geotechnischen Barrieren ableiten lassen, sowie weniger wahrscheinliche Szenarien für das Endlager, die in Bezug auf die Bemessungssituationen für die geotechnischen Barrieren ebenfalls zu prüfen sind. So wird auch im vorliegenden Fall vorgegangen, und es werden die Ergebnisse der Szenarienanalyse VSG /BEU 12/ zur Ableitung von Bemessungssituationen für die geotechnischen Barrieren herangezogen.

4.3 Strukturierung der FEP für den technischen Funktionsnachweis

Die Szenarienanalyse für das Endlagerkonzept basiert auf spezifischen Annahmen und auf FEP (Abbildung 3.1 in /BEU 12/). Für das Referenzszenarium werden spezifische Annahmen getroffen und ihm wahrscheinliche FEP in jeweils wahrscheinlicher Ausprägung zugeordnet. Für die weniger wahrscheinlichen Alternativszenarien werden die wahrscheinlichen FEP in weniger wahrscheinlichen Ausprägungen betrachtet sowie weniger wahrscheinliche FEP. Weiterhin werden für die Alternativszenarien Abweichungen von den spezifischen Annahmen untersucht. Für die geotechnischen Initial-Barrieren Schacht- und Streckenverschluss sind die FEP zu betrachten, die zur Beeinträchtigung dieser beiden Verschlüsse führen können. Die die geotechnischen Barrieren möglicherweise beeinträchtigenden Initial-FEP wurden in /WOL 12/ ermittelt und in /BEU 12/ Szenarien zugeordnet. Die wahrscheinlichen Initial-FEP, die zu einer Beeinträchtigung geotechnischer Barrieren führen können, sind in Tab. 4.2 angegeben, die auf den Angaben in /BEU 12/ basiert. Weiterhin wurden die weniger wahrscheinlichen FEP zusammengestellt, die eine Beeinträchtigung der geotechnischen Barrieren beinhalten, Tab. 4.3.

¹⁴ Anmerkung: Im Falle des ERAM wurden für das Endlager und die in ihm angeordneten geotechnischen Barrieren die Bemessungssituationen Bauzustände, (lange) trockenes Endlager und zugelaufenes Endlager unterschieden, wobei keine Einstufung der Bemessungssituationen in wahrscheinlich und wenig wahrscheinlich erfolgte.

Tab. 4.2 Initial-FEP (SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“)

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte geotechnische Barrieren
1.2.03.01	Erdbeben	SchV, StrV
1.2.09.01	Diapirismus	SchV, StrV
1.2.09.02	Subrosion	SchV
1.3.05.03	Glaziale Rinnenbildung	SchV
2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV
2.1.07.01	Konvergenz	SchV, StrV
2.1.07.02	Fluiddruck	SchV, StrV
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	SchV, StrV
2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV
2.1.08.08	Quellen des Bentonits	SchV
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	SchV, StrV
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV
2.2.01.01	Auflockerungszone	SchV, StrV
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	SchV, StrV

Tab. 4.3 Weniger wahrscheinliche FEP (SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“)

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte einschlusswirksame Barrieren
2.1.07.05	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses*	SchV
2.1.07.06	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses*	StrV
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen	SchV, StrV

*inkl. nicht anforderungsgerechter Errichtung

Alternativszenarien, die sich aus Abweichungen von den spezifischen Annahmen ergeben, sind für die geotechnischen Barrieren gegenstandslos, da sie entweder durch eiszeitliche FEP bestimmt sind und gemäß Entwurfsannahme zum Funktionszeitraum

(Kapitel 2.2.2) nicht betrachtet werden oder für die geotechnischen Barrieren nicht zutreffen.

Die FEP gemäß Tab. 4.2 und Tab. 4.3 sind nun so zu strukturieren, dass sie im technischen Funktionsnachweis berücksichtigt werden können¹⁵. Dazu werden den FEP in Tab. 4.2 und Tab. 4.3 soweit möglich Einwirkungen, Widerstände und Bemessungssituationen gemäß Kapitel 4.1 und 4.2 zugeordnet.

¹⁵ Eine vergleichende Darstellung der grundlegenden Bearbeitungsschritte einer Sicherheitsanalyse für ein Endlager und eines technischen Funktionsnachweises für eine geotechnische Barriere ist zum besseren Verständnis in Anhang B gegeben.

Tab. 4.4 Strukturierung der Initial-FEP für den technischen Funktionsnachweis (BS = Bemessungssituation, E = Einwirkung, W = Widerstand)

FEP-Nr.	FEP-Name	Klassifizierung gemäß technischem Funktionsnachweis*
1.2.03.01	Erdbeben	BS, E, in Kapitel 4.2 nicht erfasst
1.2.09.01	Diapirismus	E, Zwangsverformung
1.2.09.02	Subrosion	Ausschluss durch Entwurfsannahme, da erst bei Eiszeit relevante Größe
1.3.05.03	Glaziale Rinnenbildung	Ausschluss durch Entwurfsannahme
2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	E, Folge chemischer Einwirkung inkl. Temperatur
2.1.07.01	Konvergenz	E, durch konstitutive Beziehung äquivalent zu Gebirgsdruck
2.1.07.02	Fluiddruck	E, Fluiddruck
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	E, Quellen /Schwinden
2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	E, Zwangsverformung oder Folge von Kräften/Spannungen
2.1.08.08	Quellen des Bentonits	E, Quellen
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	E, Folge chemischer Einwirkungen inkl. Temperatur
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	E, Folge chemischer Einwirkungen inkl. Temperatur
2.2.01.01	Auflockerungszone	Weder BS, E, W, sondern Systemkomponente
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	E, Eigengewicht, Gebirgsdruck, Fluiddruck, Strömungskräfte, Zwangsspannungen

* Ist eine Klassifizierung nicht möglich oder sinnvoll, wird der Sachverhalt kommentiert.

Tab. 4.5 Strukturierung der weniger wahrscheinlichen FEP für den technischen Funktionsnachweis (BS = Bemessungssituation, E = Einwirkung, W = Widerstand)

FEP-Nr.	FEP-Name	Klassifizierung für technischen Funktionsnachweis
2.1.07.05	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	BS
2.1.07.06	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	BS
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen	E, Folge von chemischen Einwirkungen oder Strömungskräften

Aus Tab. 4.4 und Tab. 4.5 geht hervor, dass die maßgeblichen FEP, die das Verschlussystem möglicherweise beeinträchtigen, durch die in Kapitel 4 aufgeführten Einwirkungen und Bemessungssituationen weitgehend erfasst werden, lediglich die Massenkräfte, die sich infolge der Bemessungssituation Erdbeben ergeben, sind zu ergänzen.

Der technische Funktionsnachweis erfolgt also unter Berücksichtigung folgender Einwirkungen, die die integritätsverletzenden FEP beinhalten:

Chemische Einwirkungen

- Chemischer Angriff durch Lösungen und Gase, deren Zusammensetzung noch zu spezifizieren ist.
- Durch Temperaturänderungen ausgelöste chemische Einwirkungen (z. B. Löslichkeitsänderungen)

Mechanische Einwirkungen

- Einwirkungen aus Kräften und Spannungen
 - Eigengewicht
 - Gebirgsdruck
 - Fluiddruck
 - Strömungskräfte
 - Zwangsspannungen (z. B. aus Steifigkeitsdifferenzen)

- Massenkräfte (aus Erdbeben)
- Einwirkungen aus eingepprägten Verzerrungen
 - Temperaturänderungen/-differenzen in Verbindung mit thermischer Expansion/Kontraktion
 - Quellen/Schwinden
 - Kriechen/Relaxation
 - Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrundwechselwirkungen (z. B. Verformungsbehinderungen, Setzungen)

In Tab. 4.4 und Tab. 4.5 sind FEP aufgeföhrt, die im technischen Funktionsnachweis als Bemessungssituationen eingestuft werden. Dazu gehört die Bemessungssituation „bei Erdbeben“ (FEP 1.2.03.01) und die Bemessungssituation „Außergewöhnliche Situationen“ (FEP 2.1.07.05 und 2.1.07.06). Die Bemessungssituation „Ständige Situationen“ beinhaltet die übrigen, wahrscheinlichen FEP mit wahrscheinlichen Ausprägungen, die nicht ausgeschlossen wurden. Im nächsten Schritt ist zu prüfen, ob sich aus den Szenarien, die sich aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen wahrscheinlicher FEP ergeben, ebenfalls außergewöhnliche Bemessungssituationen für die geotechnischen Barrieren ableiten. In Tab. 4.6 sind die Szenarien in Folge weniger wahrscheinlicher Ausprägungen wahrscheinlicher FEP aufgeföhrt sowie das Ergebnis der Analyse, ob ein Alternativszenarium zu berücksichtigen ist /BEU 12/. FEP, die im technischen Funktionsnachweis nicht als (BS, E, W) klassifiziert werden können, sind nicht mehr aufgeföhrt.

Tab. 4.6 Zu berücksichtigende Alternativszenarien

	FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte ewB
Alternativszenarium	2.1.07.01	Konvergenz	SchV; StrV
	2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	SchV, StrV
Durch anderes Alternativszenarium abgedeckt	2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV
	2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV
	2.1.08.08	Quellen des Bentonits	SchV
	2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV
Durch Ref.-szenarium abgedeckt	1.2.03.01	Erdbeben	WG, SchV, StrV
	1.2.09.01	Diapirismus	WG, SchV, StrV
Kein Alternativszenarium	2.1.07.02	Fluiddruck	WG, SchV, StrV
	2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	WG, SchV, StrV
	2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	WG, SchV, StrV

Die FEP, für die kein Alternativszenarium abgeleitet wurde oder die durch das Referenzszenarium abgedeckt sind, sind in Bezug auf den technischen Funktionsnachweis bereits erfasst. Bei den FEP, die durch ein anderes Alternativszenarium abgedeckt sind, ist festzustellen, um welches Alternativszenarium es sich handelt und ob es unter Berücksichtigung der Strukturierung gemäß Tab. 4.4 und Tab. 4.5 im technischen Funktionsnachweis ebenfalls abgedeckt ist. Bei den abdeckenden Alternativszenarien handelt es sich um die FEP *Versagen des Schachtverschlusses* und *Versagen des Streckenverschlusses*, die als außergewöhnliche Bemessungssituation bereits erfasst sind. Letztere decken auch den FEP *Kanalisation in Dichtelementen* (2.1.08.05) ab.

So verbleiben als zu untersuchendes Alternativszenarien, die FEP *Konvergenz* und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*. Als Alternativszenarium zu *Konvergenz* ist eine Kriechklasse unterhalb oder oberhalb der wahrscheinlichen Bandbreite anzunehmen, woraus sich aufgrund der Verknüpfung über die konstitutive Beziehung Spannungsänderungen bzw. -umlagerungen ergeben. Weitere Alternativszenarien, die Spannungsänderungen bzw. -umlagerungen auslösen und nicht bereits abgedeckt sind, sind eiseitlich bedingt und somit durch die Entwurfsannahme ausgeschlossen. So verbleibt die Aufgabe, im Rahmen weniger wahrscheinlicher Szenarien die Kriech-

klasse unterhalb bzw. oberhalb der wahrscheinlichen Bandbreite zu untersuchen. Es handelt sich im technischen Funktionsnachweis also um eine modifizierte Einwirkung, die im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation zu behandeln ist.

Im Ergebnis wurden in Bezug auf das Verschlussystem eine ständige Bemessungssituation, drei außergewöhnliche Bemessungssituationen sowie die Bemessungssituation Erdbeben als maßgebend identifiziert. In Bezug auf die geotechnische Barriere Streckenverschluss ist dabei eine Besonderheit zu beachten. Der Streckenverschluss ist eine zum Schachtverschluss redundante Barriere, deren Hauptaufgabe darin besteht, beim Versagen des Schachtverschlusses die Dichtfunktion zu übernehmen. Damit ist die außergewöhnliche Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ gerade die „ständige“, weil planmäßige Bemessungssituation für den Streckenverschluss, so dass zwei ständige Bemessungssituationen für den Streckenverschluss zu behandeln sind, aber nur zwei außergewöhnliche Bemessungssituationen sowie die Bemessungssituation „Erdbeben“.

Die Bemessungssituation Bauzustände, die während der Herstellung der Verschlüsse auftritt, ist prinzipiell natürlich auch zu berücksichtigen, wird aber im Rahmen der VSG nicht vertieft untersucht, da die Beherrschbarkeit der Bauzustände über den Nachweis der Herstellbarkeit und die ausgeführten Prototypen praktisch gesichert ist.

4.4 Spezifizierung der Widerstände für den technischen Funktionsnachweis

Die die einschlusswirksamen geotechnischen Initial-Barrieren beeinträchtigenden FEP (Kapitel 4.3) beinhalten zwangsläufig keine Widerstände und auch in Kapitel 4.1 sind Widerstände nur ansatzweise konkretisiert. Widerstände sind, wie bereits erwähnt, material- und konstruktionsspezifisch und hängen deshalb vom Entwurf des Verschlussystems ab. Die Widerstände und die Grenzzustandsfunktionen sind für den gewählten Entwurf zu bestimmen. Da es sich bei den gewählten Materialien um Materialien handelt, zu denen bereits Erfahrungen vorliegen, und auch der Entwurf des Verschlussystems keine unüblichen Konstruktionsdetails enthält, kann auf vorhandene Kategorisierungen von Widerständen und Grenzzustandsbeschreibungen zurückgegriffen werden. Diese sind nachfolgend als „Struktur des technischen Funktionsnachweises“ dargestellt und begründet (Abb. 4.1).

In /EBE 09/ wurde für ein Dichtsystem, bestehend aus einem in Filterschichten eingebettetem Bentonitdichtelement, das auf setzungsstabilen Schottersäulen als Widerlager abgesetzt ist, die Verknüpfung zwischen hydraulischen Langzeitberechnungen¹⁶ und funktionsbezogenen Einzelnachweisen für einen Schachtverschluss im Tongestein abgeleitet. Für den in /EBE 09/ beschriebenen Schachtverschluss war die Länge des Dichtelementes gegeben, weiterhin war auf Grundlage einer Einschätzung eine Vorgabe für die integrale Permeabilität (den hydraulischen Widerstand) vorhanden, die von den drei parallel angeordneten Elementen Dichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone zu erfüllen war. Vorgaben zur integralen Permeabilität (vgl. Kapitel 3) sind jedoch gegenstandslos, wenn die Bauwerksintegrität nicht gegeben ist. D. h., die hydromechanische Widerstandsfähigkeit (~ Integrität) und die Beständigkeit (die hier – anders als im konventionellen Fall – ebenfalls der Integrität zugeordnet ist) sind zu gewährleisten.

Dass auch für das Bentonitdichtelement gemäß Abb. 3.2 der Nachweis der Tragfähigkeit (= des Tragwiderstandes) Voraussetzung für die Spezifizierung eines hydraulischen Widerstandes sowie die Rissbeschränkung (= Widerstand gegen Rissbildung) zu gewährleisten ist, ist offensichtlich. Die Notwendigkeit, Verformungen¹⁷ zu beschränken (Verformungswiderstand), um Auflockerungen in Grenzen zu halten, gilt für körnige Erdstoffe, denen der Bentonit zuzurechnen ist. Als Filterstabilität wird der Widerstand gegen Erosion und Suffosion, d. h. die Bildung von Strömungskanälen in körnigen Erdstoffen (auch Piping genannt), bezeichnet. Auch die Dauerhaftigkeit/chemische Langzeitstabilität ist zu gewährleisten. Damit ist für das Bentonitdichtelement die Struktur des technischen Funktionsnachweises gemäß /EBE 09/ übertragbar, siehe Abb. 4.1, wobei die thermischen Einwirkungen zusätzlich eingeführt wurden.

¹⁶ In /EBE 09/ als Radionuklidtransportmodellierungen bezeichnet, da der Bezug zu Freisetzungsszenarien bestand.

¹⁷ Dieser Nachweis ist auch bei nicht gebirgsverbundenen Dichtelementen als Nachweis der Lagestabilität zu führen; solche Dichtelemente kommen im hier vorliegenden Entwurf des Verschlusssystems nicht vor.

Beim Salzbetondichteelement handelt es sich um ein gebirgsverbundenes Dichteelement aus einem kohäsiven Baustoff¹⁸. Für ein Dichteelement (Streckenverschluss) aus demselben Material wurde in /EBE 09/ ebenfalls die Struktur des technischen Funktionsnachweises abgeleitet. Die Nachweisstruktur ist bis auf die Nachweise, die sich speziell auf körnige Erdstoffe beziehen und auf Salzbeton nicht zutreffen, identisch. Die Struktur des technischen Funktionsnachweises gemäß Abb. 4.1 ist somit für das Salzbetondichteelement abdeckend. Bei Sorelbeton handelt es sich ebenfalls um einen kohäsiven Baustoff und die Dichtelemente in Schacht- und Strecke sind ebenfalls gebirgsverbunden geplant. Damit sind für die Dichtelemente aus Sorelbeton auch die gleichen Funktionsnachweise zu führen wie für das Dichtelement aus Salzbeton.

Die Struktur des technischen Funktionsnachweises gemäß Abb. 4.1 gilt auch für das hier entworfene Verschlussystem. Sie zeigt den Bezug der Einwirkungen auf den Nachweis der Bauwerksintegrität. Die Bauwerksintegrität ist auslegungsbestimmend. Bei den chemischen Einwirkungen kann ein direkter Bezug zum Nachweis der Dauerhaftigkeit, in dem der Korrosionswiderstand des Bauwerks bewertet wird, und bei den mechanischen Einwirkungen zum Nachweis der Tragfähigkeit, in dem der Tragwiderstand bewertet wird, hergestellt werden. Der Nachweis der Riss- und Verformungsbeschränkung ist ebenfalls mit den mechanischen Einwirkungen verknüpft, wobei der Begriff „Beschränkung“ den Widerstand charakterisiert. Hydraulische Einwirkungen wirken über die hydromechanische bzw. bei der Berücksichtigung von Gasen fluidmechanische Kopplung. Das Gleiche gilt für thermische Einwirkungen, die sich über die thermochemische oder thermomechanische Kopplung auf die Bauwerksintegrität auswirken, vgl. die Zusammenstellung der Einwirkungen in Kapitel 4.2 und 4.3.

¹⁸ Kohäsive Materialien, die im Bergbau zur Verfüllung von Schächten eingesetzt werden, zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur beim Einbringen (im Bauzustand) durch Widerlager im Schachtquerschnitt solange gehalten werden müssen, bis das Material, aus dem die kohäsiven Füllsäule hergestellt wird, eine bestimmte Mindestfestigkeit erreicht hat. Danach hält es sich aufgrund der entstehenden Kohäsion an der Schachtwand und der aus der Spannungsverteilung in der Verfüllsäule selbst resultierenden Spannung auf Dauer im Schacht. Danach kann das Widerlager seine Funktion einstellen.

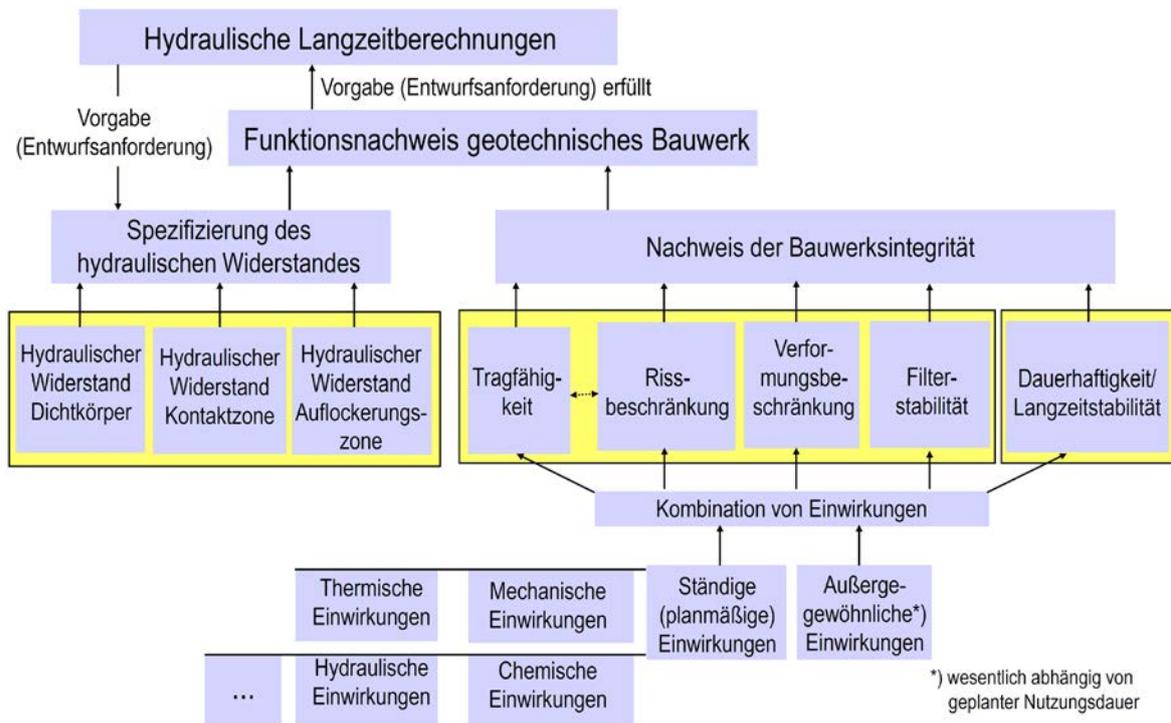


Abb. 4.1 Struktur des technischen Funktionsnachweises für das Verschlussystem

hydraulische Einwirkungen = hydromechanische Einwirkungen, thermische Einwirkungen = thermochemische und thermomechanische Einwirkungen

5 Salzgruskompaktion

Abhängig von der durch Konvergenz bedingten Kompaktion des Salzgrusversatzes und seiner vom Kompaktionszustand abhängigen Porosität und Permeabilität leiten sich Anforderungen an die erforderliche Funktionsdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse ab. Die Funktionsfähigkeit der Schacht- und Streckenverschlüsse ist nicht mehr erforderlich, sobald der kompaktierte Salzgrus eine hinreichende Abdichtfunktion aufweist.

Die GRS führt im Rahmen der VSG numerische Modellrechnungen zur Bewertung der Integrität von Verschlussbauwerken und zur Entwicklung von mit Salzgrus als Langzeitdichtung verfüllten Hohlräumen mit dem komplexen Modellierungswerkzeug CODE_BRIGHT durch /CZA 12/, /WIE 12/. Damit können prinzipiell sowohl Wirtsgesteinseigenschaften (z. B. Ausbildung der ALZ) als auch das Kompaktionsverhalten des Salzgruses (trocken, angefeuchtet) beschrieben werden. Allerdings ist der Modellansatz zur Beschreibung der Salzgruskompaktion noch nicht für die standortspezifischen Gegebenheiten parametrisiert. Da bisher entsprechende Untersuchungen fehlen, wird über die Nachrechnung von unterschiedlichen Datensätzen (BGR, GRS) versucht, die dort experimentell abgebildeten Prozesse quantitativ nachzuvollziehen.

Vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung, das Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz hinreichend zuverlässig abbilden zu können, werden die an den GRS-Versuchen (mit Porositäten im Bereich von $\phi > 10\%$) teil-validierten Stoffmodellansätze und Materialparameter bei der physikalischen Modellierung und numerischen Simulation berücksichtigt. In Ermangelung experimenteller Befunde für Salzgrus mit Porositäten im Bereich ($\phi < 1\%$) wird jedoch der numerisch simulierte Kompaktionsprozess nach Erreichen einer Endporosität von 1 % im Modell begrenzt. Mit dem entwickelten Simulationsinstrumentarium sind dann von der GRS weiterführende modelltheoretische Untersuchungen an einer mit Salzgrus versetzten Strecke mit dem Ziel durchgeführt worden, belastbare Aussagen über die zeitliche Entwicklung der Versatzporosität und den Zeitpunkt des Erreichens einer mit $\phi = 1\%$ vorgegebenen Minimalporosität treffen zu können. Dafür ist der Streckenquerschnitt einer Richtstrecke (RS) bzw. eines Querschlags (QS) auf der 870 m-Sohle in einem 2-dimensionalen Modell mit ebenem Verzerrungszustand physikalisch modelliert und die zeitliche Entwicklung der Auflocke-
rungszone in der Streckenkontur berücksichtigt worden /CZA 12/.

Die zeitliche Entwicklung der Porosität im Salzgrus hängt im Modell im Grundsatz von der Konvergenzbewegung des verfüllten Hohlraumes ab, die wiederum auf das viskose Materialverhalten des Gebirges – quantifiziert durch die Kriechklasse – zurückgeführt werden kann. Nach Vorgabe der BGR ist das Kriechverhalten des Steinsalzes in den für die Modellierung relevanten Querschnitten im Mittel mit der Kriechklasse 5 abzubilden, mit einer Bandbreite von zwei Kriechklassen /BGR 11/. Im Rahmen der hier beschriebenen modelltheoretischen Untersuchungen wurden entsprechende Berechnungen mit Ansatz einer Kriechfähigkeit des Gebirges mit Kriechklasse 5 sowie mit einer geringeren Kriechfähigkeit mit Kriechklasse 3 (in Abb. 5.1 nicht dargestellt) durchgeführt. Zusätzlich können die gewählte Hohlraumgeometrie und die Berücksichtigung des Eigengewichts des Versatzmaterials zu einer inhomogenen Verteilung der Porosität über den Streckenquerschnitt führen. Für eine einheitliche Darstellung werden die für die Mittelachse des Streckenquerschnitts ermittelten Berechnungsergebnisse herangezogen und farblich differenziert dargestellt.

Mit Blick auf die Aussagefähigkeit für die VSG soll zusätzlich zum Einfluss der Lösungszugabe auf die zeitliche Entwicklung der Versatzporosität bei isothermen Randbedingungen noch dem Einfluss einer stärkeren Kriechfähigkeit des Salinargebirges unter erhöhter Temperatur nachgegangen werden. Dazu ist ein weiteres Modell einer Einlagerungsstrecke (ELS) mit expliziter Berücksichtigung des Abfallbehälters, der als Wärmequelle fungiert, erarbeitet worden. Die verschiedenen Strecken werden im Endlager für die modelltechnische Beschreibung der Kompaktion des Salzgrusversatzes im Rahmen der Modellrechnungen für die Konsequenzenanalysen an Hand der Temperaturentwicklung (nur im Ostfeld) und des Feuchtegrades (nur in den Zugangs- und Richtstrecken) des Salzgrusversatzes fünf unterschiedlichen Kategorien zugeordnet. Diese Kategorien werden mit trocken/heiß, trocken/warm, trocken/kalt, feucht/warm und feucht/kalt bezeichnet und den jeweiligen Streckenquerschnitten zugewiesen /LAR 13/.

Die Ergebnisse dieser parallel durchgeführten rechnerischen Analysen /CZA 12/ lassen darauf schließen, dass die Salzgruskompaktion für den in den Zugangsstrecken (RS West) vorgesehenen geringfügig angefeuchteten Salzgrus mit vernachlässigbarer Temperaturerhöhung schon nach einigen hundert Jahren soweit fortgeschritten ist ($\Phi < \text{ca. } 2\%$, Abb. 5.1), dass der kompaktierte Salzgrus die Funktion der Verschlüsse, d. h. die Verhinderung des Zutritts von Lösungen aus dem Deckgebirge bis hin zu den Abfällen, allein übernehmen kann. Die Permeabilität des kompaktierten Salzgruses /CZA 12/, /WIE 12/, /POP 12/ liegt dann in der gleichen Größenordnung wie die Per-

meabilität der Verschlüsse (vgl. Abb. 5.2) mit dem niedrigsten Schätzwert der integralen Permeabilität eines Dichtelementes, die bei $7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ liegt (Kapitel 3.1). Auch in den Teilen des Einlagerungsbereiches (QS Ost), wo in der Nähe der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle der Salzgrus naturtrocken eingebracht wird, ist die Salzgruskompaktion dank der thermisch beschleunigten Konvergenz nach deutlich weniger als 1.000 Jahren hinreichend weit fortgeschritten. Lediglich bei Unterstellung der Einbringung von naturtrockenem Salzgrus in Bereichen (QS West), die nur vernachlässigbarer Temperaturerhöhung ausgesetzt sind, würde der Salzgrus mehrere tausend Jahre bis zum Erreichen einer hinreichenden Kompaktion benötigen, vgl. Abb. 5.1.

Diese rechnerischen Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit dem Prozessverständnis und werden in Bezug auf ihre zeitliche Dauer durch historische Analoga bestätigt /POP 12/.

Damit ist die Entwurfsannahme gemäß Kapitel 2.2.2 zutreffend und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen insbesondere im Hinblick auf die erforderliche Funktionsdauer der Verschlüsse haben Bestand. Dies betrifft insbesondere die Vernachlässigung eizeitlicher Einwirkungen beim Entwurf des Verschlussystems und die Gültigkeit der heutigen hydrogeologischen Bedingungen im Deckgebirge für die Auslegung der Verschlüsse.

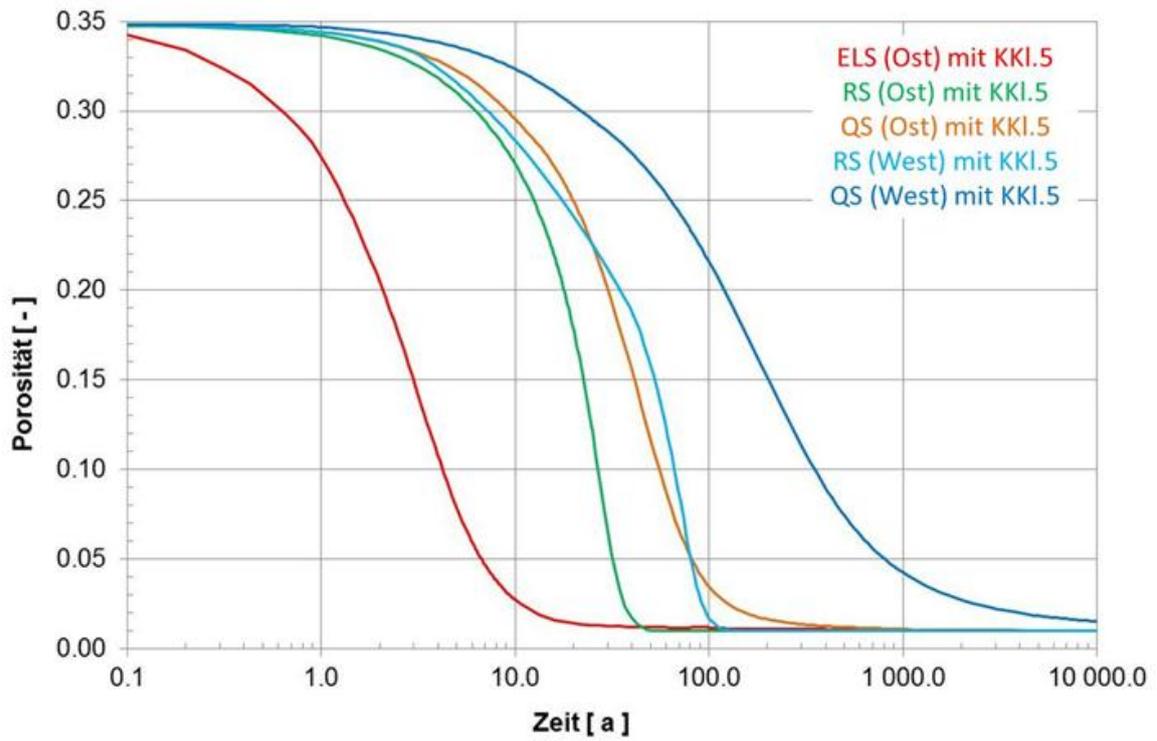


Abb. 5.1 Vergleich von Porositäts-Zeitverläufen mit Salzgrus versetzter Strecken bei unterschiedlichen Randbedingungen /CZA 12/

(ELS – Einlagerungsstrecke, RS – Richtstrecke, QS – Querschlag)

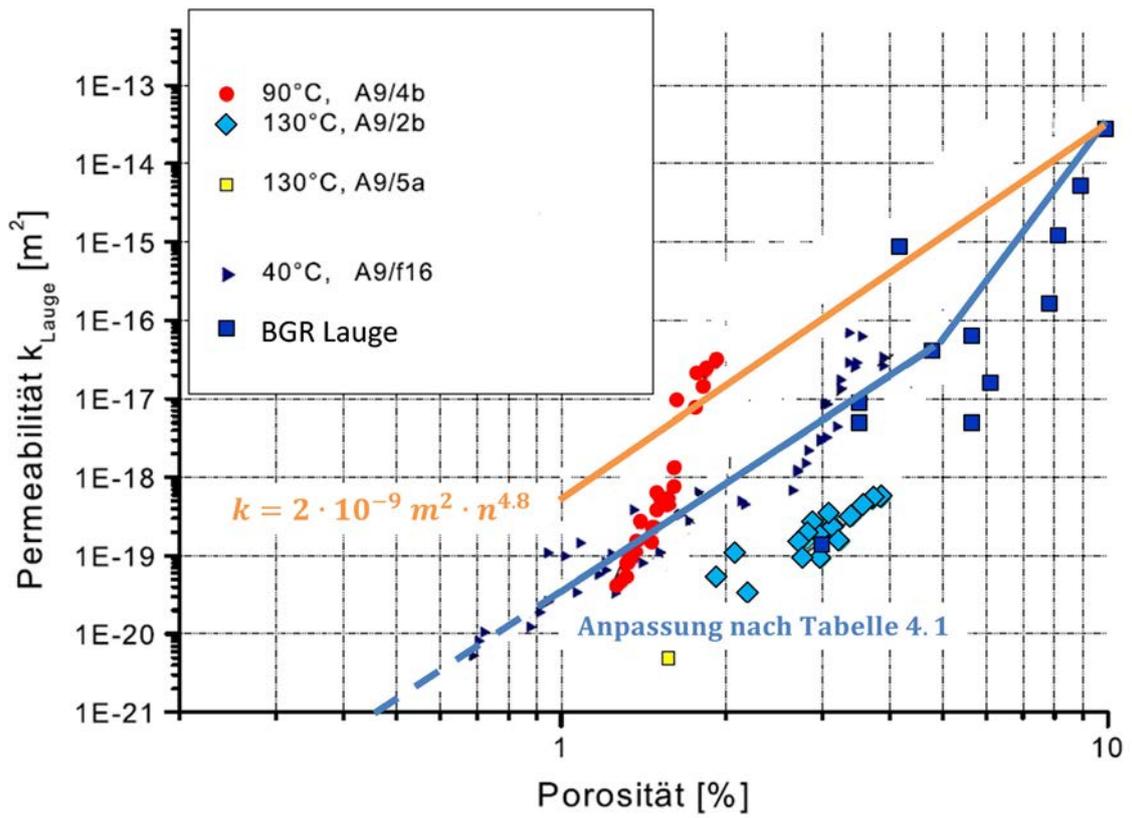


Abb. 5.2 Porositäts-Permeabilitätsbeziehung für naturtrockenen Salzgrus (orange) und feuchten Salzgrus (blau) /WIE 12/

6 Berücksichtigung langer Funktionszeitdauern der Verschlüsse

Die in /CEN 10/ angesetzten Werte für die Versagenswahrscheinlichkeit sowie die anderen hier entsprechend herangezogenen Regelwerke (siehe Kapitel 4) beziehen sich auf eine Nutzungsdauer (Lebensdauer, Funktionsdauer) üblicher Bauwerke von 50 – 100 Jahren. Auch wenn die Funktionsfähigkeit der Verschlüsse nur für 1.000 Jahre erforderlich ist, für 50.000 Jahre unterstellt wird und diese Zeiträume deutlich kleiner sind als der Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre für das Endlagersystem, ist zu prüfen, wie sich der gegenüber üblichen Bauwerken auf 50.000 Jahre verlängerte Funktionszeitraum für die Verschlüsse auf die Versagenswahrscheinlichkeit auswirkt.

Aus der Beschreibung des thermodynamischen Verhaltens des Verschlussystems lässt sich unter Einbeziehung des chemischen Verhaltens keine Restriktion bzgl. der Funktionsdauer ableiten, vorausgesetzt, die Verschlüsse sind gegenüber den Einwirkungen, die in der verlängerten Funktionsdauer auftreten, ausgelegt.

Im nächsten Schritt ist zu prüfen, ob sich aus den Anfangsbedingungen und den ggf. zeitlich veränderlichen Randbedingungen, denen das Verschlussystem unterworfen ist, Einschränkungen bzgl. der Funktionsdauer ergeben.

Da das Verschlussystem so an die Anfangsbedingungen angepasst wird, dass es 50 – 100 Jahre seine Funktion erfüllt, wird plausibel davon ausgegangen, dass aus den Anfangsbedingungen keine zeitliche Beschränkung existiert, da die Anfangsbedingungen über die Prozessbeschreibung erfasst sind. So ist es ausreichend, die in der Zeit veränderlichen Randbedingungen zu berücksichtigen.

Für die weitergehende Bewertung werden die FEP gemäß Tab. 4.4 herangezogen, die als Einwirkung klassifiziert wurden, und geprüft, ob sie als äußere oder innere Randbedingung des Systems interpretiert werden müssen. In /BEU 12/ wurde eine orientierende zeitliche Einordnung der FEP vorgenommen. Für die FEP nach Tab. 4.4, die als Einwirkung klassifiziert wurden, besteht keine zeitliche Beschränkung (vgl. Tabelle 5.3 in /BEU 12/). Sie müssen deshalb in Abhängigkeit der Modellbeschreibung als innere oder äußere Randbedingung gemäß ihrem Zeitverlauf berücksichtigt werden, sofern sie nicht bereits in die Prozessbeschreibung integriert sind.

Als erstes Ergebnis wird festgehalten, dass sich weder aus den Prozessbeschreibungen noch aus der Art der vorhandenen Anfangs- und Randbedingungen eine zeitliche Beschränkung der Funktionsdauer des Verschlussystems ableiten lässt.

In /CEN 10/ ist eine Anmerkung enthalten, die darauf hinweist, aus welchen Gründen die Nutzungsdauer (Funktionsdauer) von Bauwerken beschränkt ist. So ist in /CEN 10/ unter Abschnitt 4.1 angemerkt:

„Der charakteristische Wert der klimatischen Einwirkungen beruht auf 98 % Überschreitungswahrscheinlichkeit der Extremwertverteilung der wesentlichen zeitveränderlichen Basisvariablen für einen Bezugszeitraum von 1 Jahr. Dies entspricht einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren. ...“

D. h., die für konventionelle Bauwerke maßgeblichen Einwirkungen werden für einen Bezugszeitraum (Funktionsdauer) abgeleitet. Überträgt man diese Überlegungen auf die vorliegende Fragestellung, ist im Hinblick auf den Ausschluss eines Versagens im nächsten Schritt zu überprüfen, ob sich aus den FEP eine zeitliche Beschränkung ergibt. Dies betrifft die FEP, die als Einwirkungen klassifiziert wurden, weil sie in einem längeren Nachweiszeitraum möglicherweise

- größer sind (z. B. Fluiddruck durch Berücksichtigung des Meeresspiegelanstiegs),
- öfter auftreten (z. B. Erdbeben unterhalb der Größe des Sicherheitserdbebens),
- länger andauern (z. B. Alterations- und Korrosionsprozesse)

und deshalb zu Versagen führen.

Die maßgeblichen FEP werden nachstehend diesbezüglich überprüft.

- *Erdbeben*: Die Ableitung des Sicherheitserdbebens und seiner Kennwerte erfolgte nicht mit Bezug auf eine zeitliche Beschränkung, sondern seine Größe ist geotektonisch limitiert.
- *Diapirismus*: Der Maximalwert von 1 m wurde in Bezug auf einen Zeitraum von 50.000 Jahren abgeleitet. Es ergibt sich daraus eine Begrenzung der Funktionsdauer auf 50.000 Jahre gemäß den Annahmen aus Kapitel 2.2.2.
- *Alteration*: Wird über die Anfangsbedingungen initiiert, ist anschließend Bestandteil der Prozessbeschreibung und damit erfasst.

- *Konvergenz*: Durch konstitutive Beziehung dem FEP *Spannungsänderung und Umlagerung* zugeordnet.
- *Fluiddruck*: Der Maximalwert inkl. des säkularen Meeresspiegelanstiegs wurde in Bezug auf eine Funktionsdauer bis zur nächsten Eiszeit abgeleitet. Die in Kapitel 2.2.2 gegebene Begründung bleibt gültig. Es ergibt sich daraus eine Begrenzung der Funktionsdauer auf 50.000 Jahre.
- *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*: Siehe FEP *Spannungsänderung und -umlagerung*.
- *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*: Die ungünstigsten Bedingungen mit maximaler Lageverschiebung (Erdbeben, thermisch induzierte Verformungen) sind früh zu erwarten. Die Einwirkung Erdbeben wird bereits von üblichen Nachweiszeiträumen erfasst. Zu berücksichtigen sind auch thermisch induzierte Verformungen. Sie treten im Zeitraum < 10.000 Jahre /KOC 12/ auf und sind über die konstitutive Beziehung als Zwangsverformung erfasst.
- *Quellen des Bentonits*: Wird über Anfangsbedingungen initiiert, ist anschließend Bestandteil der Prozessbeschreibung und damit erfasst.
- *Auflösung und Ausfällung*: Wird über die Anfangsbedingungen initiiert und durch die zeitliche Veränderung der Randbedingungen beeinflusst, ist somit Bestandteil der Prozessbeschreibung und damit erfasst.
- *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*: Wird über die Anfangsbedingungen initiiert, ist anschließend Bestandteil der Prozessbeschreibung und damit erfasst.
- *Spannungsänderung und -umlagerung*: *Spannungsänderungen und -umlagerungen* sind durch verschiedene Ursachen bedingt, die in Einwirkungen aufgeschlüsselt sind. Maßgebend sind die mechanischen Einwirkungen in Kapitel 4.3. Sie werden einzeln in Bezug auf ihre zeitliche Beschränkung untersucht.
 - Eigengewicht: Keine zeitliche Beschränkung.
 - Fluiddruck: Siehe FEP *Fluiddruck*, innerhalb des Verschlusssystems sind zeitlich veränderliche Fluiddrücke und Strömungskräfte Bestandteil der Prozessbeschreibung und somit erfasst.
 - Strömungskräfte: Maximalwerte sind früh in der Aufsättigungsphase zu erwarten und sind somit von üblichen Nachweiszeiträumen erfasst.

- Zwangsspannungen (nicht thermisch induziert): Über konstitutive Beziehungen Bestandteil der Prozessbeschreibungen und somit erfasst.
- Massenkräfte: Siehe FEP *Erdbeben*.
- Thermospannungen/-verformungen: Maximalwerte treten im Zeitraum < 10.000 Jahre auf und sind über die konstitutiven Beziehungen erfasst.
- Quellen/Schwinden: Über konstitutive Beziehungen Bestandteil der Prozessbeschreibung und somit erfasst.
- Kriechen/Relaxation: Über konstitutive Beziehungen Bestandteil der Prozessbeschreibungen und somit erfasst.
- Zwangsverformungen (nicht thermisch induziert): Über konstitutive Beziehungen Bestandteil der Prozessbeschreibungen und somit erfasst.

Als zweites Ergebnis ist festzuhalten, dass sich aus den quantitativen Größen (Extremwerten) der FEP, die als Einwirkungen klassifiziert wurden, eine zeitliche Beschränkung von 50.000 Jahren ergibt, weil genau dieser Zeitraum bei der Ableitung ihrer quantitativen Größe zu Grunde gelegt wurde. Dieses Vorgehen entspricht methodisch der Vorgehensweise nach /CEN 10/, wo ebenfalls die Extremwerte der Einwirkungen mit Bezug auf einen Zeitraum von 50 Jahren abgeleitet wurden, auch wenn dieser deutlich kürzer ist.

Weiterhin wird im /CEN 10/ unter Abschnitt 3 in Prinzip (5) ausgesagt:

„Nachweise für Grenzzustände, die von der Nutzungszeit abhängen (z. B. Ermüdung), sollten auf die geplante Nutzungszeit des Tragwerks bezogen werden.

Anmerkung: Die meisten zeitabhängigen Einflüsse sind kumulativ.“

Überträgt man diese Aussage auf die vorliegende Fragestellung, ist abschließend zu überprüfen, ob sich eine zeitliche Beschränkung aus Einwirkungen ergibt, die nicht durch die Extremwerte bestimmt sind, sondern durch ihr wiederholtes Auftreten, so dass Schädigungsakkumulation (Ermüdung) auftritt, die letztlich zu Versagen führt. Voraussetzung dafür ist, dass Einwirkungen mehrfach auftreten, diese nicht einsinnig wirken und somit ihr Schädigungspotential nicht durch ihren Maximalwert (Extremwert) bestimmt ist. Von den o. a. FEP und Einwirkungen kann lediglich die Einwirkung Erd-

beben mehrfach wiederholt auftreten, alle anderen FEP und Einwirkungen treten im Nachweiszeitraum von 50.000 Jahren nicht wiederkehrend auf. Aufgrund der geringen Erdbebenhäufigkeit am Standort Gorleben kann eingeschätzt werden, dass die Zahl Erdbeben auch in 50.000 Jahren so gering ist, dass eine Schädigungsakkumulation ausgeschlossen werden kann, die zu Ermüdungsversagen führt.

Als Fazit ist festzustellen, dass sich für das Verschlussystem weder aus seiner thermodynamischen Beschreibung noch aus den Anfangs- und Randbedingungen eine Beschränkung des Funktionszeitraums ableiten lässt, die geringer ist als die Entwurfsannahme für den Funktionszeitraum. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Verschlussystem ausreichende Widerstände gegen die Einwirkungen aufweist, denen es im Funktionszeitraum ausgesetzt ist.

7 Vorbemessung der Verschlüsse

Das Verschlussystem beinhaltet Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse. Die Verschlüsse werden als geotechnische Bauwerke eingestuft und unterliegen damit den in /CEN 09/, /CEN 10/ beschriebenen Qualitätsanforderungen. Die konzeptuelle Auslegung des Verschlussystems erfolgt im Wesentlichen im Sinne einer Vorbemessung.

Die Vorbemessung eines Bauwerks wird vorgenommen, da eine endgültige Bemessung des Bauwerks erst nach Abschluss aller Planungsstadien erfolgen kann. Erst zu diesem Zeitpunkt stehen alle notwendigen Parameter fest¹⁹. Um schon während des Planungsprozesses eine konkretere Vorstellung über die Abmessungen der vorgesehenen Bauteile (hier z. B. Dichtelemente und Widerlager) zu erhalten sowie die grundsätzliche Realisierbarkeit des Bauwerksentwurfs nachzuweisen, werden Bauwerke in der Regel vordimensioniert. Dabei werden vereinfachte, überschlägige Abschätzungen im Hinblick auf die zu erwartenden Ergebnisse der Dimensionierung getroffen und das weitere Planungsgeschehen verläuft auf Basis dieser Abschätzungen /MÜL 12b/.

Im Rahmen einer Vorbemessung werden Prozesse i. d. R. entkoppelt betrachtet, da eine gekoppelte Betrachtung für eine Vorbemessung meistens zu aufwändig ist.

Aus der Entkopplung ergibt sich nachstehende Reihenfolge:

- Chemische Vorbemessung zur Beantwortung der Frage, ob die chemischen Einwirkungen soweit beherrschbar sind, dass keine maßgebliche Permeabilitätserhöhung oder eine mechanische Beeinträchtigung (z. B. durch Festigkeitsverlust) erfolgt.
- Mechanische Vorbemessung zur Beantwortung der Frage, ob die mechanischen Einwirkungen soweit beherrschbar sind, dass keine maßgeblichen Rissbildungen oder Auflockerungen mit der Folge signifikanter Permeabilitätserhöhung entstehen.

¹⁹ Z. B. die endgültige Geometrie der Verschlüsselemente und damit ihr Eigengewicht. Das Eigengewicht geht aber in die Auslegung mit ein. Es besteht also eine Rückkopplung und deshalb ist eine Iteration notwendig.

- Hydraulische Vorbemessung zur Beantwortung der Frage, ob das Verschlussystem geeignet ist, das Entwurfsziel „kein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen“ zu erfüllen.

7.1 Geochemische Vorbemessung des Verschlussystems

Die praktisch in unbegrenzter Menge vorhandenen Deckgebirgswässer stellen Einwirkung für das Verschlussystem dar, die primär beherrscht werden muss, um einen geochemisch induzierten Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu verhindern. Gegen sie ist das Verschlussystem, das die Schacht- und Streckenverschlüsse beinhaltet, geochemisch vorrangig auszulegen. Die salzstockinternen Lösungen sind zwar gegenüber einzelnen Baustoffen hoch korrosiv, aufgrund ihrer geringen Menge sind sie in Bezug auf das von ihnen ausgehende Korrosionspotenzial jedoch vernachlässigbar.

7.1.1 Auslegungsbestimmende Deckgebirgswässer

Aus der Konstruktion des Ausbausystems der Schächte leiten sich zwei durch die Herkunft bedingte unterschiedliche Zusammensetzungen von Deckgebirgswässern ab, die zu betrachten sind. Sie sind nachstehend aufgeführt /LIN 12/.

Erste Herkunft: Nach Verschluss der Schächte sinkt der Spiegel der Asphaltabdichtung zwischen Innenausbau und Außenausbau (Abb. 2.7) allmählich ab²⁰. Als Folge sickern neben dem Oberflächenabfluss der Regenpende zuerst die Deckgebirgswässer aus den oberflächennahen, quartären Schichten in die Schächte. Bei diesen Wässern handelt es sich um Süßwasser bis schwach saline Wässer mit einem Salzgehalt von 0,1 g/l bis 5 g/l. Sie sind in Bezug auf ihre betonangreifende Wirkung der Expositions-kategorie XA1 zugeordnet /KLI 11/.

Zweite Herkunft: Die Asphaltabdichtung wird lokal undicht. Dieser Sachverhalt ist dann von Bedeutung, wenn es sich um Deckgebirgswässer handelt, die eine deutlich andere

²⁰ Messungen der Asphaltspiegelhöhen in den Schächten Gorleben 1 und Gorleben 2 liegen vor. Bei Bedarf wird Asphalt nachgefüllt.

Zusammensetzung aufweisen, als die Deckgebirgswässer erster Herkunft. Dieser Sachverhalt ist gegeben, wenn die gesättigte NaCl-Lösung aus dem geklüfteten Hutgesteinsbereich zutritt. Ihr Salzgehalt beträgt 320 g/l. Sie sind in Bezug auf ihre betonangreifende Wirkung der Expositionsklasse XA3 zugeordnet /KLI 11/.

Diese beiden Lösungszusammensetzungen werden im Folgenden als Regenwasser (RW) und Gipshutlösung (GL) bezeichnet. Zu berücksichtigen ist, dass diese Lösungen, bevor sie mit dem Verschlussystem in Kontakt kommen, mit dem Normalbeton des Schachtausbaus (Kapitel 2.1.4.1) sowie dem Salz oberhalb des Verschlussystems Kontakt haben und sich entsprechend verändern. Anschließend sickern/migrieren die Lösungen durch das Verschlussystem gemäß Kapitel 3 und den dort spezifizierten Materialien. Aus der Anordnung der Feststoffe im Schacht und den sukzessiven Reaktionen mit den Lösungen ergeben sich zwei Lösungsabfolgen, die als Regenwasserfolge und Gipshutfolge bezeichnet werden, vgl. Abb. 7.1 und Abb. 7.2. Die sich jeweils einstellenden Lösungszusammensetzungen werden für die Regenwasserfolge mit R1 bis R6 bezeichnet, für die Gipshutfolge mit G1 bis G6. In Abb. 7.1 und Abb. 7.2 ist nur der Schacht dargestellt. Die Abfolge gilt jedoch auch für das Verschlussystem als Ganzes, da die Streckenverschlüsse analog zum untersten Dichtelement im Schacht aus Sorelbeton hergestellt werden.

In /XIE 12/ wurden auch die geringen Mengen schachtinterner Lösungen detailliert betrachtet. Ihre Beschreibung erfolgt hier nicht, jedoch wird ihr Korrosionspotenzial abschließend mit angegeben.

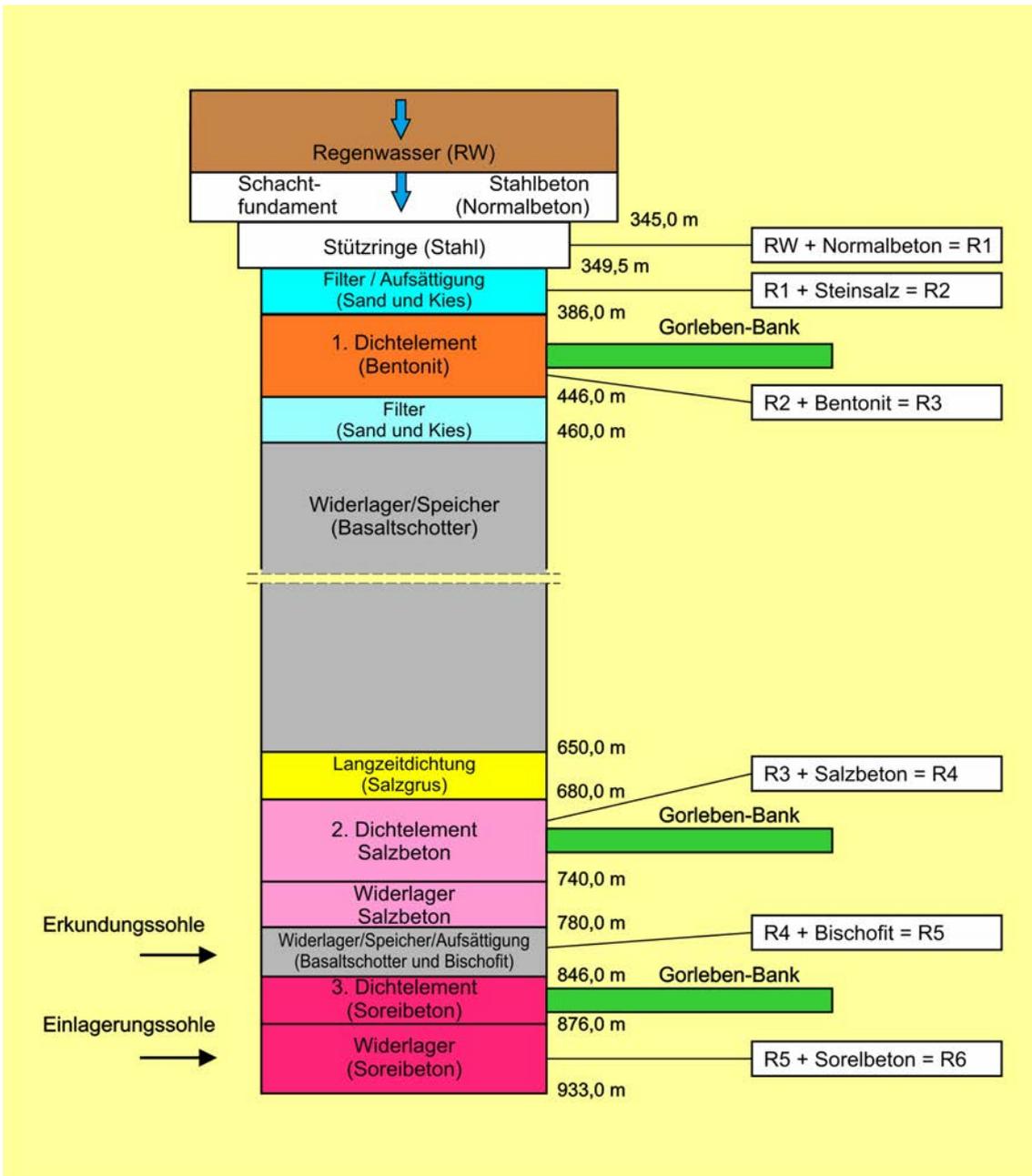


Abb. 7.1 Veränderung des Chemismus einsickernder Regenwässer in den verschiedenen Dichtelementen des Schachtverschlusses (Regenwasserfolge) /XIE 12/

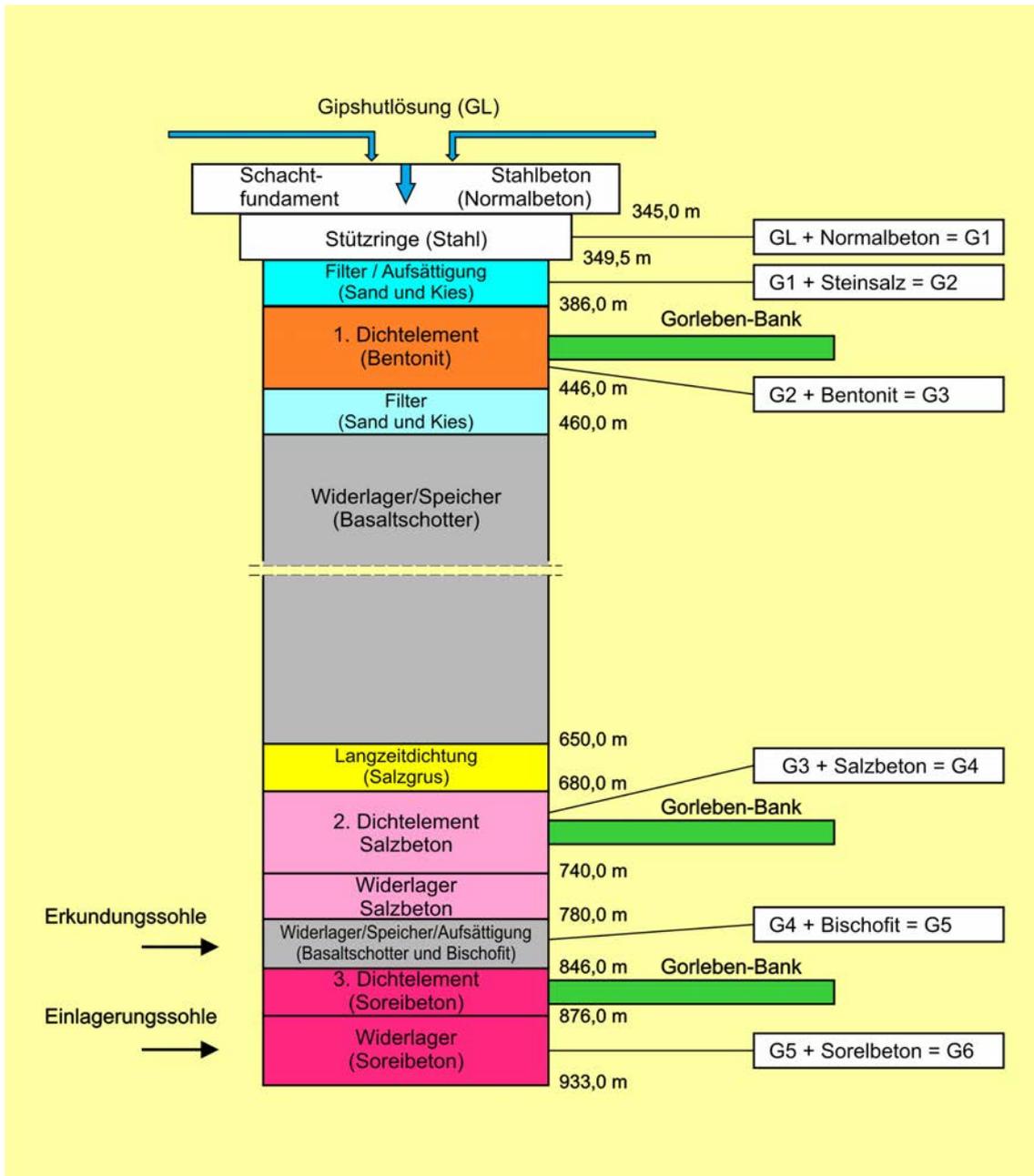


Abb. 7.2 Veränderung des Chemismus einsickernder Gipschlösungen in den verschiedenen Dichteelementen des Schachtverschlusses (Gipschlutfolge) /XIE 12/

7.1.2 Vorgehensweise bei der geochemischen Vorbemessung

Die geochemische Vorbemessung erfolgt mit Hilfe der zwei geochemischen Simulationsprogramme PHREEQC /PAR 99/ und EQ3/6 /WOL 03/. PHREEQC wurde zur Modellierung des Ionenaustausches im Bentonit genutzt, alle weiteren geochemischen Modellierungen erfolgten mit EQ3/6.

Beide Programme basieren auf der Ermittlung von Lösungsgleichgewichten, wobei im Rechenmodell in ein Lösungsvolumen definierter Zusammensetzung Feststoff eingebracht und das zugehörige Lösungsgleichgewicht ermittelt wird. Limitierende Faktoren sind entweder das Lösungsvolumen einer definierten Zusammensetzung oder die Menge des zur Verfügung stehenden Feststoffes. Die Reaktionspfade bis zur Gleichgewichtseinstellung basieren auf geochemischen Datenbasen, die in /XIE 12/ detailliert aufgeführt sind. Die Ermittlung der Lösungsgleichgewichte erfolgt nun sukzessive für die Regenwasserfolge und die Gipshutfolge gemäß Abb. 7.1 und Abb. 7.2. Die Lösungsvolumina stellen entweder das Speichervolumen gemäß Abb. 7.1 und Abb. 7.2 dar oder das Porenvolumen der Feststoffe. Für die Betonbaustoffe wird einheitlich ein Porenvolumen von 20 % angenommen²¹, d. h. ein Feststoff-Lösungsverhältnis von $Z_i = 4$. Für den Bentonit wird lediglich ein Ionenaustausch bis zum Gleichgewicht betrachtet. Am Salzspiegel wird Aufsättigung in Bezug auf eine gipshutorientierte Lösung angenommen. Für die Mg^{2+} -Aufsättigung durch technischen Bischofit wird eine Grenze von 0,53 M überprüft, ab der die Sorelbetonstabilität gewährleistet ist. Damit ergibt sich die in Tab. 7.1 aufgeführte geochemische Modellierungsabfolge. Die silikatischen Baustoffe Sand, Kies, Splitt und Schotter des Speichervolumens werden als inert betrachtet.

Tab. 7.1 Lösungsfolge aus den Reaktionen zwischen Lösungen und Feststoffphasen im Schacht

Berücksichtigte Feststoffe	Modellierungsrandbedingung	Regenwasserfolge	Gipshutlösungsfolge
Normalbeton	$Z_i=4$	R1	G1
Salzspiegel/ Salzhalde	Gipshutlösungs- orientierte Aufsättigung	R2	G2
Bentonit	Gleichgewichts-Ionen-Austausch	R3	G3
Salzbeton	$Z_i=4$	R4	G4
Bischofit	$Mg^{2+} > 0,53 \text{ M}^*$	R5	G5
Sorelbeton	$Z_i=4$	R6	G6

* mol/kg/H₂O

²¹ Es wird nicht zwischen totaler und effektiver Porosität unterschieden, da der Korrosionsprozess selbst zu einer Vernetzung des Porenraums führt.

Weitere Annahmen für die geochemischen Berechnungen sind:

- (1) Veränderungen des Regenwassers bei Durchfluss durch die obere Schachtverfüllung sind vernachlässigbar.
- (2) Unterhalb des Salzspiegels im Bereich des Schachtfundamentes setzt Betonkorrosion ein.
- (3) Im Falle der Gipshutfolge wird nur Gipshutlösung betrachtet, eine Mischung mit Regenwasser bzw. Süßwasser erfolgt nicht.
- (4) Die Deckgebirgswässer kommen von oben und haben zuerst Kontakt mit dem Innenausbau bzw. Schachtfundament.
- (5) Die Temperatur (25 °C) und Druckbedingungen (1 bar) werden als konstant angenommen.
- (6) Alle geochemischen Berechnungen basieren auf thermodynamischen Gleichgewichtszuständen, Reaktionskinetik wird nicht berücksichtigt.
- (7) Regenwasser steht im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem CO₂ in der Atmosphäre. In allen anderen Berechnungen sind die Gasphasen eliminiert.
- (8) In den Berechnungen mit zementbasiertem Bindemittel (Normal- und Salzbeton) wird nur die Bildung ausgewählter Phasen berücksichtigt /XIE 12/.
- (9) Im Falle des Bentonits werden nur Ionenaustauschprozesse berücksichtigt; Lösungs- und Fällungsprozesse nicht.
- (10) Sand- und Kieszuschlag im Normalbeton wird als inert angenommen.

7.1.3 Chemische Zusammensetzung der Ausgangslösungen und -feststoffe

Die bei den geochemischen Analysen berücksichtigten Zusammensetzungen der Ausgangslösungen „Regenwasser“ und „Gipshutlösung“ sind in Tab. 7.2 angegeben, die chemische Zusammensetzung der Feststoffphasen in Tab. 7.3. Letztere basiert auf den Angaben in /ENG 11a/, die Umrechnung in die Feststoffphasen ist in /XIE 12/ beschrieben.

Bentonit hat eine Trockendichte von 1.650 kg/m³ und eine Porosität von im Mittel 30 %. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) beträgt 62 meq/100g /MÜL 83/. Die austausch-

baren Ionen sind Na^+ (1,8 meq/100g), K^+ (1,8 meq/100g), Mg^{2+} (22,4 meq/100g) und Ca^{2+} (37,6 meq/100g).

Tab. 7.2 Chemische Zusammensetzung der Deckgebirgslösungen /XIE 12/

Element	Konzentration [mol/kg H ₂ O]	
	Regenwasser	Gipshuttlösung
Na^+	8,07E-05	4,96E+00
K^+	1,90E-06	3,61E-02
Ca^{++}	1,98E-04	3,52E-02
Mg^{++}	n.e.	5,64E-02
Cl^-	8,07E-05	5,07E+00
SO_4^{4-}	1,98E-04	5,15E-02
$\text{SiO}_2(\text{aq})$	n.e.	5,49E-04
Al^{+++}	n.e.	1,19E-05
HCO_3^-	3,19E-06	2,10E-03
pH	5,81	6,3

n.e. = nicht existent

Tab. 7.3 Chemische Zusammensetzung der Feststoffphasen /XIE 12/

Element	Feststoffphase [mol/kg]				
	Haldensalz	Normalbeton*	Salzbeton	Sorelbeton	Bischofit
Na	16,426	0,014	12,346	10,565	0,120
K	0,000	0,019	0,026	0,003	0,054
Ca	0,220	1,250	1,685	0,180	0,007
Mg	0,000	0,189	0,292	3,571	4,974
Cl	16,426	0,000	12,253	12,161	10,088
S	0,220	0,033	0,228	0,195	0,024
Si	0,000	0,661	0,975	0,000	0,000
Al	0,000	0,199	0,359	0,000	0,000
O	0,881	10,488	9,348	12,907	28,353
H	0,000	14,517	8,275	18,734	56,514
C	0,000	0,028	0,000	0,000	0,000

* ohne Sand und Kies

7.1.4 Theoretische Grundlagen der Betonkorrosion

Auf Grundlage vorhandener experimenteller Ergebnisse und Berechnungen /MEY 02/, /MEY 03/, /MEY 08a/, /HAG 09/ ist gesichert, dass in hochsalinaren Lösungen lösender Angriff dominiert, vgl. /XIE 12/.

Zur Quantifizierung der Kapazität einer Lösung zementgebundenes Material zu korrodieren, wurde der Parameter Umlösekapazität [m^3/m^3] /MEY 08a/ eingeführt, der in seiner volumenspezifischen Formulierung wie folgt lautet:

$$K_u = V_B/V_L = (m_B \cdot \rho_L)/(\rho_B \cdot m_L) \quad (7.1)$$

In Gl. (7.1) ist V_B das Bindemittelvolumen ohne Porenraum [m^3] und V_L das minimale Lösungsvolumen [m^3], das in der Lage ist, die festigkeitsgebenden Bindemittelphasen vollständig aufzulösen. In Normalbeton und Salzbeton basieren die festigkeitsbildenden Bindemittelphasen auf C-S-H (Calcium-Silikat-Hydrat) Phasen, z. B. CSH(0,8), CSH(1,1) und CSH(1,8). Im Fall des Sorelbetons ist die festigkeitsbildende Bindemittelphase die Mg-Oxychlorid-Phase ($\text{Mg}_2\text{Cl}(\text{OH})_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Wird als m_B die Bindemittelmasse [kg] bezeichnet, die die Korndichte ρ_z (ohne Porenraum) [kg/m^3] aufweist, und als m_L die minimale Masse der Lösung mit der Lösungsdichte ρ_L [kg/m^3], lässt sich die Umlösekapazität als massenspezifische Größe K_m [kg/kg] angeben:

$$K_m = m_B / m_L \quad (7.2)$$

K_u bzw. K_m gemäß Gleichung (7.1) und (7.2) beschreiben somit das Korrosionspotential der Lösung gegenüber den Bindemitteln. Je größer die K_m -Werte sind, desto höher ist die Korrosion bzw. umso korrosiver ist die Lösung gegenüber dem Bindemittel.

7.1.5 Modellierungsergebnisse

Als Berechnungsergebnisse sind in Tab. 7.4 und Tab. 7.5 die Umlösekapazitäten für die Regenwasserfolge und die Gipshutfolge gegenüber den durch lösenden Angriff gefährdeten Normalbeton, Salzbeton und Sorelbeton aufgeführt. Der Bentonit nimmt über Ionenaustausch am Prozess teil, wird aber selbst nicht umgelöst.

Tab. 7.4 Umlösekapazität der Regenwasserfolge gegenüber Normalbeton (R1), Salzbeton (R4) und Sorelbeton (R6)

Lösung	K_u [m ³ /m ³]	K_m [kg/kg]	Korrosionspotential
R1	7,12 E-4	0,0015	sehr gering
R4	0,225	0,394	mittel
R6	6,73E-8	1,16E-7	nicht vorhanden

Tab. 7.5 Umlösekapazität der Gipshutfolge gegenüber Normalbeton (G1), Salzbeton (G4) und Sorelbeton (G6)

Lösung	K_u [m ³ /m ³]	K_m [kg/kg]	Korrosionspotential
G1	0,03	0,055	gering
G4	0,24	0,417	mittel
G6	6,72E-8	1,16E-7	nicht vorhanden

Die in Tab. 7.4 und Tab. 7.5 dargestellten Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Richtigkeit der Anordnung der Materialien zur Vermeidung eines korrosiv bedingten Zutritts von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den eingelagerten Abfällen. Eine genauere Analyse der Ergebnisse ergab, dass der Anstieg des Korrosionspotentials von (R1/G1) auf (R4/G4) in Bezug auf die zementgebundenen Betone in der Abfolge Normalbeton → Salzbeton auf den natürlichen Magnesiumgehalt des Bentonits zurückzuführen ist, der durch Ionenaustausch in der zutretenden Salzlösung zu einer Erhöhung der Mg²⁺-Konzentration führt.

Es kann keine Kinetik betrachtet werden, so dass zum zeitlichen Ablauf der Korrosion keine Angabe gemacht werden kann. Da die eingebrachte Bentonitmasse, die das hauptsächliche Korrosionspotential liefert, bekannt und beschränkt ist, wird deshalb eine Obergrenze für das Korrosionspotential abgeschätzt und die maximale Masse an korrodierbarem Salzbeton ermittelt. Für die Analyse wird konservativ angenommen, dass sämtliches im Bentonit austauschbar vorhandenes Magnesium in Lösung geht und sich im Lösungsreservoir (Speichervolumen 2.327 m³) zwischen Bentonitdichtelement und Salzbetondichtelement befindet. Ausgehend von der Lösung R2 bzw. G2 (Abb. 7.1 und Abb. 7.2) wird das gesamte austauschbare Magnesium gelöst. Unter der Annahme, dass keine weiteren Magnesiumquellen bzw. Senken vorhanden sind, ergibt sich für die Regenwasserfolge eine massenspezifische Umlösekapazität von 0,2825 kg/kg und für die Gipshutfolge von 0,2914 kg/kg. Damit beträgt die maximal

korrodierbare Salzbetonmasse im Falle der Regenwasserfolge 802 t und im Falle der Gipshutfolge 827 t.

Für die hochkorrosiven internen Salzlösungen im Schacht wurde eine korrodierbare Salzbetonmasse von 125 t ermittelt /XIE 12/.

Die maximal korrodierbare Salzbetonmasse ergibt sich im ungünstigen Fall der Gips-
hutfolge zu 827 t. Werden die hochkorrosiven Salzlösungen im Schacht kumulativ be-
rücksichtigt, erhöht sich die korrodierbare Salzbetonmasse um 125 t auf 952 t /XIE 12/.
D. h., im ungünstigsten Fall und unter Zugrundelegung konservativer Annahmen kön-
nen durch zutretende Deckgebirgslösung und schachtinterne Lösungen in Summe ma-
ximal 952 t Salzbeton Typ Asse korrodiert werden. Diese Salzbetonmasse wird als
Opferschicht von 10 m Dicke zusätzlich berücksichtigt, vgl. Abb. 8.1. Der teilweise kor-
rodierte und somit aufgelockerte Salzbeton bildet schwerkraftbedingt im Speichervolu-
men einen schützenden Bodensatz für das Salzbetondichtelement. Da die Magnesium-
abreicherung der Lösung gewährleistet ist, kann auch eine lokalisierte Korrosion
praktisch ausgeschlossen werden.

Durch das Salzbetondichtelement tritt in Folge der Korrosion von Bindemittelphasen
eine an Mg^{2+} abgereicherte Salzlösung, die hoch korrosiv gegenüber Sorelbeton ist.
Da im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle Carnallit lokal angefahren ist, vgl.
Abb. 2.5, können Magnesiumquellen nicht ausgeschlossen werden. Um definierte Ver-
hältnisse zu erzeugen, wird die abgereicherte Lösung R4 gemäß Tab. 7.1 und Tab. 7.2
mit Hilfe eines Depots an technischem Bischofit soweit an Mg^{2+} aufgesättigt, dass die
Sorelbetonstabilität für das 3. Dichtelement gegeben ist.

Da das Sorelbetondichtelement im Schacht im Vergleich zum Salzbetondichtelement
einen vergleichsweise geringen hydraulischen Widerstand aufweist, wird davon ausge-
gangen, dass bereits ein Durchtritt von Lösungen in das Speichervolumen des Infra-
strukturbereichs der Einlagerungssohle stattfindet, während der Infrastrukturbereich
der Erkundungssohle noch mit Lösung aufgefüllt wird. D. h., die Bischofitmenge wird so
bemessen, dass die Sorelbetonstabilität unter Ansatz des in beiden Infrastrukturberei-
chen vorhandenen Resthohlraums gegeben ist. Eine grobe Abschätzung ergab eine
Masse von 19.000 t technischen Bischofits, die in den Infrastrukturbereich der Erkun-
dungssohle eingebracht wird. Das im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle ver-
bleibende Resthohlraumvolumen (Volumenermittlung) beträgt 41.800 m^3 , das Porenvo-
lumen von beiden Infrastrukturbereichen 87.400 m^3 .

Die geochemische Analyse erfolgt in folgenden Schritten

- (1) Es wurden 41.800 m³ R4-Lösung angenommen und anschließend mit 87.400 – 41.800 = 45.600 m³ NaCl-Lösung gemischt, die die nachfließende NaCl-Lösung simuliert.
- (2) Die sich ergebende Lösung mit dem Namen B4 reagiert mit 19.000 t Bischofit (B5).

In der durch geochemische Modellierung ermittelten Lösung beträgt die MgCl₂-Konzentration 0,98 mol/kg H₂O und ist deutlich höher als die Mindestkonzentration von 0,53 mol/kg H₂O. Damit ist die Bischofitmenge von 19.000 t ausreichend, die Sorelbestonstabilität zu gewährleisten, wodurch Korrosion vermieden wird.

Die Streckenverschlüsse bestehen wie das 3. Dichtelement im Schacht aus Sorelbeton und werden erst nach Durchtritt der Lösung durch das 3. Dichtelement im Schacht erreicht. Sie werden deshalb durch die geochemischen Modellierungen für den Schacht mit abgedeckt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Verschlussystem einen hinreichenden Widerstand gegen einen korrosionsinduzierten Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen aufweist, wenn eine zusätzliche Salzbeton-Opferschicht von 10 m Dicke eingebracht wird. Die auftretende Korrosion konzentriert sich dann auf die Opferschicht bzw. wird durch das geplante Bischofitdepot im Vorfeld vermieden. Dies gilt auch im Falle der durch die wärmeentwickelnden Abfälle zu erwartenden, erhöhten Temperaturen /XIE 12/, die an den Positionen der Verschlüsse jedoch unter 60 °C liegen. Alterationsprozesse im Betonit (z. B. Illitisation) verlaufen unter den thermischen und geochemischen Bedingungen im Schacht Gorleben 1 sehr langsam und sind deshalb vernachlässigbar /XIE 12/.

7.2 Mechanische Vorbemessung des Schachtverschlusses

7.2.1 Auslegungsbestimmende Deckgebirgslasten

Die Einwirkungen Gebirgsdruck, bzw. die Gebirgsauflast, und der hydraulische Druck der Deckgebirgswässer stellen aufgrund ihrer Größe die zu beherrschenden Einwirkungen dar, um einen mechanisch induzierten, durch Rissbildung oder Auflockerung

hervorgerufenen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu vermeiden. Die Dichte der Schachtverfüllung im Bereich des Deckgebirges wird bis zur Tagesoberfläche einheitlich zu 2.240 kg/m^3 angesetzt, für die Lösungssäule wird vereinfachend und konservativ gesättigte NaCl-Lösung mit einer Dichte von 1.200 kg/m^3 angenommen, wobei im Einzelfall die Höhe der Lösungssäule um 50 m erhöht wird, um einen klimabedingten Meeresspiegelanstieg zu berücksichtigen. Das Eigengewicht einzelner Funktionselemente ist im Vergleich zu den o. g. Drücken vernachlässigbar gering, wird aber oft berücksichtigt, da seine Berücksichtigung einfach ist.

Weiterhin werden die Massenkräfte in Folge Erdbeben betrachtet, da sie trotz der regional nur geringen Erdbebenintensität möglicherweise Auslöser von auslegungsbestimmenden Verformungen (Setzungen) sind, die zu einem durch Auflockerung induzierten Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen führen.

7.2.2 Vorgehensweise bei der mechanischen Vorbemessung

Die für die mechanische Vorbemessung verwendeten Rechenmodelle basieren auf einfachen, analytischen Ansätzen. Ausgangspunkt aller Ansätze sind Betrachtungen zum statischen Gleichgewicht am starren Körper, Verformungen werden – sofern erforderlich – im Nachgang durch Einsetzen der konstitutiven Beziehung aus den Spannungsverteilungen ermittelt.

Dazu ist anzumerken, dass für die Vorbemessung in vielen Fällen Rechenmodelle verwendet werden, die vor der Existenz leistungsfähiger Computer angewendet wurden. Die Vorbemessung liefert deshalb bereits empirisch abgesicherte und somit belastbare Ergebnisse.

Im Rahmen der Vorbemessung erfolgt

- (1) Die Abschätzung der Tiefe der Auflockerungszone zur Bestimmung der Nachschnitttiefe
- (2) Die Abschätzung der erforderlichen Widerlagerlänge für kohäsive Widerlagerelemente

- (3) Die Abschätzung der Setzungen der Filterschicht in Folge der Auflast
- (4) Die Abschätzung der zusätzlichen Setzungen unter Erdbebenbelastung

Die Bestimmung der Nachschnitttiefe ist ein Zwischenergebnis, das notwendig ist, um die Abmessungen der Funktionselemente zu ermitteln. Die Abmessungen der Funktionselemente gehen in die folgenden Abschätzungen 2. – 4. ein.

7.2.2.1 Abschätzung der Tiefe der Auflockerungszone

Im Folgenden wird angenommen, dass im Bereich der Auflockerungszone, in dem die kleinste Hauptspannung sehr gering ist, der Beginn der Auflockerung (Dilatanz) mit dem spannungsbasierten Kriterium nach Mohr-Coulomb beschrieben werden kann. Die Ausdehnung der Auflockerungszone, auch als plastische Zone bezeichnet, rund um die als kreisförmig angenommene Schachtröhre kann dann bei Annahme eines isotropen Grundspannungszustandes und sonst elastischem Verhalten²² im Gebirge und in einem homogenen Gebirgsausschnitt mit Gl. (7.3) ermittelt werden, vgl. /WAG 05/.

$$\frac{r_0}{r_a} = \left[\frac{2}{\kappa + 1} \cdot \frac{(\kappa - 1) \cdot p_G + \sigma_D}{\sigma_D} \right]^{\frac{1}{\kappa - 1}} \quad (7.3)$$

Mit

$$\kappa = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

r_0	plastische Zone
r_a	Hohlraumradius
p_G	Gebirgsdruck
σ_D	einaxiale Druckfestigkeit
φ	Winkel der inneren Reibung

²² Elastisches Verhalten liegt im Steinsalzgebirge zwar nicht vor, trotzdem kann diese Näherung eines elastoplastischen Verhaltens im Rahmen einer Vorbemessung verwendet werden. Die Größe der Auflockerungszone wird im Rahmen der vertieften Nachweisführung /MÜL 12c/ überprüft.

Der Gebirgsdruck ergibt sich zu

$$p_G = z_T \cdot \gamma \quad (7.4)$$

z_T Teufe
 γ Wichte

Aufgrund der Formulierung von Gl. (7.3) ergibt sich eine Grenzteufe, ab deren Überschreitung überhaupt erst eine Auflockerungszone ausgewiesen wird, ein Sachverhalt, der nicht der praktischen Erfahrung entspricht. Die empirische Praxis zeigt, dass Bereiche, in denen die kleinste Hauptspannung weniger als 1 MPa beträgt, häufig aufgelockert sind, wobei als Einflussgrößen z. B. Temperaturschwankungen und Schwankungen der Luftfeuchtigkeit angesehen werden können. Deshalb wird neben der Ausdehnung der plastischen Zone als zusätzliche Bedingung mittels Gleichung (7.5) überprüft, in welchem Abstand die Radialspannung bei elastisch angenommenen Gebirgsverhalten rechnerisch gerade 1 MPa beträgt.

$$\sigma_r = p_G \left[1 - \frac{r_a^2}{r_i^2} \right] \quad (7.5)$$

r_a Hohlraumradius
 r_i Abstand zur Hohlraumachse, an dem die Radialspannung den Wert σ , annimmt
 p_G Gebirgsdruck

Die Dichte des Deckgebirges und des Salzgebirges wird einheitlich angesetzt /KOC 12/. Sie beträgt 2.240 kg/m³ (Wichte 0,022 MN/m³).

Zur Bestimmung der plastischen Zone wurde das Dilatanzkriterium nach Hunsche und Cristescu /CRI 98/ durch einen Mohr-Coulomb Ansatz approximiert. Die als Parameteranpassung in Gleichung (7.3) eingehenden Kennwerte für diesen Ansatz wurden /WAG 05/ entnommen. Sie sind nachstehend aufgeführt.

- Parameteranpassung der einaxialen Druckfestigkeit: 16 MPa
- Parameteranpassung des Winkels der inneren Reibung: 37°

Die Ermittlung der erforderlichen Nachschnitttiefe erfolgt an den in Tab. 7.6 aufgeführten „mittleren“ Positionen der Dichtelemente (vgl. Abb. 3.2), so dass noch eine maßvolle Veränderung der Lage der Dichtelemente möglich ist, ohne dass sich relevante Veränderungen des Nachschnitts ergeben. Hierbei werden für die beiden oberen

Dichtelemente „mittlere“ Positionen der Abschnitte jeweils ober- und unterhalb der Gorleben-Bank angegeben. Die rechnerischen Werte sind in Tab. 7.6 aufgeführt, wobei der Schachtradius gemäß Kapitel 2.1.4.1 mit 3,815 m (= 7,63 m Schachtdurchmesser) angesetzt wurde.

Tab. 7.6 Kenngrößen zur Ermittlung der erforderlichen Nachschnitttiefe

Dichtelement Nr.	Teufe [m]	Gebirgsdruck [MPa]	Dicke plastische Zone [cm]	Dicke bei $\sigma_r = 1$ MPa [cm]
1	401	8,8	8	24
1	431	9,5	13	22
2	695	15,3	60	13
2	725	15,9	64	13
3	861	18,9	84	11

In Tab. 7.7 ist der Nachschnitt angegeben, mit dem die Berechnungen im Rahmen der Vorbemessung weitergeführt werden. Dabei wird für das erste Dichtelement die Nachschnitttiefe in etwa verdoppelt, weil in geringen Teufen und bei längerer Standzeit die Vorbemessung oft zu geringe Nachschnitttiefen ergibt. So wandert in Folge der langen Standzeit die 1 MPa Grenze relaxationsbedingt tiefer ins Gebirge und die Ausdehnung der entlasteten Bereiche wächst. In größeren Teufen spielt die 1 MPa Grenze keine Rolle mehr, da die Nachschnitttiefe durch die Ausdehnung der plastischen Zone bestimmt wird, vgl. Tab. 7.6.

Tab. 7.7 Gewählte Nachschnitttiefen

	Nachschnitttiefe [cm]
1. Dichtelement	50 gewählter Wert
2. Dichtelement	60
3. Dichtelement	80
Widerlager	Nachschnitt nicht zwingend erforderlich, Entfernung von Auflockerungen an der Oberfläche durch Berauben

7.2.2.2 Abschätzung der erforderlichen (fiktiven) Widerlagerlänge für kohäsive Widerlagerelemente

Bei dem 2. und dem 3. Dichtelement handelt es sich um zylindrische Dichtpfropfen (Festkörper), die aus kohäsiven Baustoffen hergestellt und auch kohäsiv mit dem Gebirge verbunden sind.

Für einen zylindrisch geformten Pfropfen bestehend aus Widerlager und Dichtelement werden die auslegungsbestimmenden Spannungen zur Abtragung des hydrostatischen Druckes im Baukörper und in der Kontaktzone analytisch ermittelt. Dieses alte, in der Praxis bewährte Verfahren ist sehr einfach und anschaulich. Zu beachten ist dabei, dass die auf den Pfropfen wirkende Belastung aufgrund der kohäsiven Eigenschaften des Baustoffes auf der Seite, an der die Belastung angreift, in das Gebirge abgetragen wird. Durch Einsetzen der zulässigen Grenzfestigkeiten, für die gerade Tragfähigkeit und Rissbeschränkung gewährleistet sind (vgl. Abb. 4.1), wird eine Widerlagerlänge errechnet, die notwendig ist, um die Belastung abzutragen. Zieht man diese Widerlagerlänge vorsorglich von der hydraulisch wirksamen Länge des Pfropfens ab und weist sie gesondert aus – was nicht zwingend zu tun ist – liegt man mit der Auslegung auf der konservativen Seite. Dieser Weg wird im Falle des 2. Dichtelementes aus Salzbeton gewählt, da ausreichend Platz zur Anordnung eines zusätzlichen Widerlagers vorhanden ist. Zieht man die Widerlagerlänge nicht von der hydraulisch wirksamen Länge des Pfropfens ab, sind die auslegungsbestimmenden Spannungen zusätzlich zu beschränken, da in diesem Fall das Dichtelement gleichzeitig die Widerlagerfunktion (fiktives Widerlager) übernimmt. Diese Vorgehensweise wird im Falle des Sorelbetondichtelementes gewählt, da für die Anordnung eines zusätzlichen deckgebirgsseitigen Widerlagers kein Platz vorhanden ist.

Zur Ermittlung der (fiktiven) Widerlagerlänge werden die Schubspannungen in der Kontaktzone auf die zulässigen Schubspannungen (Scherfestigkeit) beschränkt sowie die Zugspannungen im Baukörper auf die zulässige Zugspannung (Zugfestigkeit). Die größere der beiden auf diese Weise ermittelten (fiktiven) Widerlagerlängen ist auslegungsbestimmend.

Für die (fiktive) Widerlagerlänge in Folge Begrenzung der Schubspannungen an der Kontur gilt /LAN 64/:

$$\text{erf } L_{w,T} = \frac{A \cdot p_{FL}}{U \cdot \text{zul } \tau} \quad (7.6)$$

erf $L_{w,T}$	Länge zur Ableitung der statischen Last
A	Querschnittsfläche der Stirnfläche
p_{FL}	hydrostatischer Druck auf der Stirnfläche
U	Querschnittsumfang
zul τ	zulässige Schubspannung in der Kontaktzone

Im Hinblick auf Zugversagen ist der Baukörper aus Salzbeton maßgebend. Die für den Biegespannungsnachweis erforderliche fiktive Widerlagerlänge lässt sich wie folgt bestimmen /MOH 64/:

$$\text{erf } L_{w,bz} = r \sqrt{\frac{0,375 (1 + \nu) \cdot p_{FL}}{\text{zul } \sigma_z}} \quad (7.7)$$

erf $L_{w,bz}$	Länge zur Aufnahme der Biegezugspannungen
r	Radius
p_{FL}	hydrostatischer Druck auf der Stirnfläche
ν	Querdehnzahl des Baukörpers
zul σ_z	zulässige Zugspannung im Baukörper

Für die Verschlusselemente aus Salzbeton und Sorelbeton wird für die Vorbemessung der Druck einer an der Oberkante des Dichtelementes anstehenden Lösungssäule unterstellt, die bis zur Tagesoberfläche reicht. Weiterhin wird die Höhe der Lösungssäule um 50 m vergrößert, um den Einfluss eines klimabedingten Meeresspiegelanstiegs zu berücksichtigen. Vereinfacht und konservativ wird ohne Differenzierung eine Lösungssäule aus NaCl gesättigter Salzlösung mit einer Dichte von 1.200 kg/m^3 unterstellt. Die Teufe der Dichtelemente und die in dieser Teufe anstehenden Lösungsdrücke sind zusammen mit den Berechnungsergebnissen für die (fiktive) Widerlagerlänge in Tab. 7.9 aufgeführt. Die Last aus der Füllsäule und der Schottersäule wird nicht angesetzt, da sie aufgrund des Siloeffektes in der Schottersäule oberhalb der Dichtelemente in die Schachtkontur abgetragen wird.

Für den verdichteten Salzgrus der Langzeitdichtung sind keine Kennwerte vorhanden, es wird jedoch konservativ davon ausgegangen, dass er im Sinne eines kohäsiven „Schüttguts“ eigentragfähig ist und deshalb sein Eigengewicht keine maßgebliche Belastung des Salzbetondichtelementes darstellt. Diese Einschätzung wird durch die Untersuchungen in /SCH 04/ belegt, die darauf hinweisen, dass für einen bei Einbau auf eine Anfangsporosität von 10 % verdichteten Salzgrus eher das Verhalten eines kohä-

siven Festkörpers zu erwarten ist als das eines Schüttguts. Das Eigengewicht der zylindrischen Dichtpfropfen wird vernachlässigt.

Für die kohäsiven Baustoffe Salzbeton Typ Asse und Sorelbeton A1 sind in Tab. 7.8 die benötigten Festigkeitskennwerte zur Ermittlung der fiktiven Widerlagerlänge angegeben, vgl. Gl. (7.6) und Gl. (7.7). Von Interesse sind dabei die Bemessungswerte, die aus /NAU 06/, /WEI 11/, /BFS 09/ abgeleitet wurden, vgl. auch /MÜL 12b/, /ENG 11a/. Weiterhin ist in Tab. 7.8 die in Gleichung (7.7) benötigte Querdehnzahl angegeben.

Die geometrischen Daten, die für die Ermittlung der Widerlagerlängen zu Grunde gelegt werden, ergeben sich aus dem Schachtdurchmesser von 7,63 m und der Nachschnitttiefe gemäß Tab. 7.7, siehe Tab. 7.9. Die sich daraus ergebenden (fiktiven) Widerlagerlängen finden sich in Tab. 7.9.

Tab. 7.8 Angaben zum Festigkeitsverhalten (Bemessungswerte) sowie Angaben zur Querdehnzahl (Mittelwerte), vgl. /MÜL 12b/

Material	Zugfestigkeit (= zul σ_z)	Scherfestigkeit auf Kontakt τ_s (= zul τ)	Querdehnzahl (= ν)
Sorelbeton A1	2,83 MPa	2,2** MPa	0,24
Salzbeton Typ Asse	0,97* MPa	1,94** MPa	0,13

* geschätzt aus Indexwert (geteilt durch Faktor 2)

** Werte bei $\sigma_n = 1$ MPa

Tab. 7.9 Fiktive Widerlagerlängen der Dichtelemente aus Salzbeton und Sorelbeton

Verschluss- element	Teufe OK Dichtelement [m]	Druck p_{fl} OK Dichtelement [MPa]	Radius r inkl. Nachschnitt [m]	Erforderliche Widerlagerlängen [m]	
				erf. $L_{w,T}$	erf. $L_{w,bz}$
Salzbeton	680	8,6	4,415	9,78	8,55
Sorelbeton	846	10,5	4,615	11,06	6,08

Im Ergebnis dieser Berechnungen wird am Salzbetondichtelement beidseitig ein Widerlagerabschnitt von mehr als 10 m angeordnet. Gewählt wird jeweils eine Länge von 25 m (Berücksichtigung vorläufiger Ergebnisse des FuE-Vorhabens KOMTESSA (ISIBEL II)). Unter der angenommenen Belastung ist nur das deckgebirgsseitige Widerlager erforderlich. Es wird jedoch vorsorglich auch grubenseitig angeordnet, für den Fall,

dass sich dort ein erhöhter Druck, z. B. in Folge des in die Vorbemessung nicht einbezogenen Gaspfades, ergibt. Beim Sorelbetondichtelement wird auf ein gesondert ausgewiesenes Widerlager²³ aus Platzgründen verzichtet und ein geringerer Ausnutzungsgrad in Bezug auf die zulässigen Spannungen angenommen, so dass als fiktive Widerlagerlänge die vorhandene Länge des Sorelbetondichtelementes von 30 m angesetzt werden darf. Dieser Ansatz ist gerechtfertigt, da der Druckaufbau auf das Sorelbetondichtelement später und langsamer erfolgt, so dass von einer höheren Normalspannung auf der Kontur und damit höheren aufnehmbaren Schubspannungen ausgegangen werden kann, die aber im Rahmen der Vorbemessung nicht quantifiziert werden.

In Bezug auf die Einwirkung Erdbeben wird angenommen, dass der Fall für das 2. und 3. Dichtelement nicht maßgebend ist, da die dynamischen Kennwerte (Festigkeit und Steifigkeit) kohäsiver Baustoffe i. d. R. deutlich über den Kennwerten liegen, die bei statischer Belastung zu Grunde zu legen sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die beiden kohäsiven Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton unter Berücksichtigung der zusätzlichen Widerlagerlänge jeweils einen ausreichenden Widerstand gegen einen mechanisch durch Rissbildung induzierten Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen aufweisen. Dies gilt sowohl für den Baukörper als auch für die Kontaktzone. Ohne Rissbildung findet keine dilatante Auflockerung statt und die Verformungen bleiben beschränkt. Die Tragfähigkeit ist damit konstruktionsbedingt automatisch gegeben.

7.2.2.3 Abschätzung von Spannungen und Verformungen einer geschichteten Schottersäule

Beim ersten Dichtelement aus Bentonit handelt es sich um einen Dichtpfropfen aus einem körnigen Erdstoff, dessen Kohäsion so gering ist, dass sie vernachlässigt wird. Er ist somit nicht kohäsiv mit der Gebirgskontur verbunden und benötigt deshalb ein Widerlager zur Gewährleistung seiner Funktionsfähigkeit. Die Funktion des Widerlagers übernimmt eine Schottersäule aus Hartgesteinsschotter (Basalt), siehe Tab. 3.1.

²³ Ggf. ist für die Bauzustände ein Behelfswiderlager erforderlich, um das Sorelbetondichtelement ausreichend einzuspannen.

Um die Funktionsfähigkeit des Bentonitdichteletes zu gewährleisten, ist die mögliche Auflockerung des Bentonits zu beschränken. Voraussetzung dafür ist, dass die Verformungen (Setzungen) der als Widerlager für das Bentonitdichteletes dienenden Filterschichten und der Schottersäule auf ausreichend kleine Werte beschränkt sind.

Die Spannungen und Verformungen in einer Schottersäule bzw. einer Schüttgutsäule werden nach der Silotheorie berechnet. Die Untersuchungen im FuE-Vorhaben Schacht Salzdetfurth /BRE 02/ zeigen, dass die analytische Lösung nach der Silotheorie /ECK 76/ sehr gut mit Messergebnissen in einer Schottersäule und Beobachtungen sowie auch mit dem Ergebnis genauerer, numerischer Berechnungen übereinstimmt. Die hier verwendete analytische Lösung ist nachstehend aufgeführt.

Die vertikalen Spannungen in einer geschichteten Schottersäule lassen sich nach /ECK 76/, /WAG 05/ wie folgt ermitteln:

$$\sigma_z = \frac{\rho \cdot g \cdot A}{\lambda \cdot U \cdot \tan \varphi_w} \left[1 - e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot U \cdot \tan \varphi_w}{A}} \right] + p_0 \cdot e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot U \cdot \tan \varphi_w}{A}} \quad (7.8)$$

- ρ Einbaudichte des (angefeuchteten) Schotters
- g Erdbeschleunigung
- A Schachtquerschnitt
- U Schachttumfang
- z Tiefe (ab Oberkante Schottersäule)
- φ_w Wandreibungswinkel
- φ Winkel der inneren Reibung des Schotters
- λ Horizontalallverhältnis, hier mit $\lambda = (1 - \sin \varphi)$ für den Ruhedruck
- p_0 Auflast auf die Schottersäule

Die Horizontalspannungen betragen dann

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \cdot \sigma_z \quad (7.9)$$

Die Verschiebungen in Folge der Auflast p_0 auf eine Schottersäule ergeben sich bei behinderter Querdehnung (vgl. /WAG 05/)

$$\varepsilon_x = 0 = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (\text{für } \varepsilon_y \text{ entsprechend}) \quad (7.10)$$

- E Elastizitätsmodul
- ν Querdehnzahl

dann wie folgt:

$$\varepsilon_z = \frac{p_0 \cdot (1 - 2\lambda\nu)}{E} \cdot e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot U \cdot \tan \varphi_w}{A}} \quad (7.11)$$

$$\Delta l = \frac{p_0 \cdot (1 - 2\lambda\nu)}{E} \int_0^L e^{\frac{-z \cdot \lambda \cdot U \cdot \tan \varphi_w}{A}} dz \quad (7.12)$$

- L Länge der Schottersäule
 Δl Verschiebung der Schottersäule

Durch Integration der nichtlinearen Stauchungen nach Gl. (7.11) über die Höhe der Schottersäule (Gl. (7.12)) erhält man die rechnerischen Setzungen zu

$$\Delta l = \frac{p_0 \cdot (1 - 2\lambda\nu)}{E} \cdot \frac{1}{\frac{\lambda \cdot U \cdot \mu}{A}} \cdot \left[-e^{\frac{-L \cdot \lambda \cdot U \cdot \mu}{A}} + 1 \right] \quad (7.13)$$

Für die Schüttgüter (= körnige Erdstoffe) sind die für die Silotheorie erforderlichen Kennwerte in Tab. 7.10 angegeben. Da das Verformungsverhalten von Interesse ist, sind Mittelwerte bzw. best estimates aufgeführt, auch wenn es sich um Materialkennwerte handelt, die üblicherweise dem Festigkeitsverhalten zugeordnet sind.

Tab. 7.10 Ausgewählte Kennwerte für das Verformungsverhalten /WAG 05/, /SCH 94/, /MÜH 99/ und Dichte /MÜL 12a/

Material	Elastizitätsmodul E	Querdehnzahl ν	Winkel der inneren Reibung (Ruhedruck) φ	Wandreibungswinkel φ_w	Dichte ρ
Bentonit	keine Festigkeit, nur als Belastung angesetzt				1.750 kg/m ³
Sand, Kies, etc.	0,15 GPa	0,33	35°	35°	1.900 kg/m ³
Schotter	0,2 GPa	0,32	36°	46°	1.700 kg/m ³
Salzgrus	vernachlässigt				

Zur Ermittlung der Setzung der Filterschicht und der Schottersäule wird konservativ für die Verfüllsäule oberhalb des Bentonitdichtelementes die Auflast des Deckgebirges (Überlagerungsdruck) zu Grunde gelegt. Das Bentonitdichtelement wird vollständig als Belastung angesetzt. Weiterhin wird der klimabedingte Meeresspiegelanstieg von 50 m berücksichtigt.

Damit ergeben sich folgenden Auflasten:

- Meeresspiegelanstieg: $1200 * 9,81 * 50 = 0,59 \text{ MPa}$
- Überlagerungsdruck: $2240 * 9,81 * 386 = 8,48 \text{ MPa}$
- Belastung aus Bentonit: $1750 * 9,81 * (446-386) = \underline{1,03 \text{ Mpa}}$
- Summe p_0 : $10,10 \text{ MPa}$

Bei einer Dicke der Filterschicht von 14 m ergibt sich gemäß Gl. (7.13) mit den Kennwerten nach Tab. 7.10 eine Setzung von 27 cm, wobei Spannungen in Folge Auflast p_0 in 14 m Tiefe auf etwa 11 % ihres Wertes abgeklungen sind (Gl. (7.8)). Einschließlich der Vertikalspannungen aus der Filterschicht in 14 m Tiefe beträgt der Druck auf die Schottersäule daher nur noch 1,25 MPa. Für die Schottersäule werden nur noch geringe Setzungen von 2 cm ermittelt. Die Gesamtsetzung beträgt rechnerisch 29 cm.

Eine Setzung von 29 cm ist für das 60 m dicke Dichtelement ertragbar, da die potenziellen Auflockerungen gering sind (Orientierungswert 30 cm pro 10 m Dicke bzw. 3 % mittlere Auflockerung /WAG 05/).

7.2.2.4 Abschätzung der zusätzlichen Setzung einer Schottersäule unter Erdbebenbelastung

Während die Festigkeiten und Steifigkeiten von kohäsiven Baustoffen unter dynamischer Belastung zunehmen, weisen körnige Erdstoffe ein anderes Verhalten auf. Der dynamische Elastizitätsmodul bzw. Steifemodul nimmt analog zu kohäsiven Baustoffen stark zu, der dynamische Schubmodul bzw. die Schubsteifigkeit nimmt aufgrund des Lösens von Kornverzahnungen jedoch stark ab. Zur Abschätzung der Setzung einer Schottersäule unter Erdbebenbelastung wird deshalb folgendes Ersatzfedermodell gewählt, das von nachstehenden vereinfachenden Annahmen ausgeht. Da der dynamische E-Modul bzw. Steifemodul eines Schotters über den entsprechenden statischen Werten liegen, der dynamische Schubmodul bzw. die dynamische Schubsteifigkeit in Folge des Lösens von Kornverzahnungen jedoch stark abnimmt, wird angenommen, dass die Scherfestigkeit (hier: Wandreibung) gegen die Schachtkontur im Zeitraum der Starkbebenphase vollständig aufgehoben wird und der Schotter und seine Auflasten mit der Erdbeschleunigung und dem Vertikalanteil der Erdbebenbeschleunigung (/DIN 05/, Abschnitt 12.2.1) sich in den Schacht bewegen. Dieser „freie

Fall mit zusätzlicher Erdbebenbeschleunigung“ wird gebremst durch eine Widerstandskraft, die sich aus der Normalsteifigkeit der Schottersäule (Federsteifigkeit) ergibt. Für dieses System gilt als Anfangsbedingung zum Beginn der Starkbebenphase (Zeitpunkt t_0) für die Schottersäule:

$$x(t_0) = 0 \text{ und } v_y(t_0) = 0, \text{ weiterhin } a(t_0) = g + a_v \quad (7.14)$$

x	Verschiebung der Schottersäule
v_v	Geschwindigkeit der Schottersäule
a	Beschleunigung der Schottersäule
g	Erdbeschleunigung
a_v	Vertikalbeschleunigung in Folge Erdbeben

Gebremst wird die Setzung der Schottersäule durch die Widerstandskraft F_b , die sich mit der Ersatzfederkonstante C wie folgt ergibt

$$F_b = C \cdot x(t) \text{ mit } C = E_{\text{dyn}}A/L \quad (7.15)$$

bzw. in der flächenbezogenen Formulierung

$$f_b = c \cdot x(t) \text{ mit } c = E_{\text{dyn}}/L \quad (7.16)$$

E_{dyn}	dynamischer Elastizitätsmodul
A	Schachtquerschnitt
L	Länge der Schottersäule

Unter Verwendung dieses Ansatzes sind zwei Fälle zu unterscheiden. Im Fall 1 ist die Dauer der Starkbebenphase so lang, dass im Ersatzfedermodell eine neue, statische Gleichgewichtslage eingenommen wird. Im Fall 2 ist die Dauer der Starkbebenphase nicht lang genug, um diese neue Gleichgewichtslage zu erreichen bevor die Wandreibung wieder einsetzt und der Setzungsprozess zum Stillstand kommt. Beide Fälle werden im Folgenden betrachtet:

Bei Erreichen einer neuen Gleichgewichtslage Widerstandskraft = Beschleunigungskraft (Fall 1) gilt

$$f_b = c \cdot x = m \cdot a \quad (7.17)$$

Der zugehörige zurückgelegte Weg, die Setzung, errechnet sich daraus zu

$$x = m \cdot a / c \quad (7.18)$$

Bei einer kurzen Dauer der Starkbebenphase t_{beb} (Fall 2) errechnet sich der gegen die Widerstandskraft in der Zeit der Starkbebenphase zurückgelegte Weg zu

$$x = \frac{1}{2} (a - c/m \cdot x) t_{\text{beb}}^2 \quad (7.19)$$

Damit gilt

$$2x / t_{\text{beb}}^2 + c/m \cdot x = a \quad \text{bzw.} \quad (7.20)$$
$$x = a / (2 / t_{\text{beb}}^2 + c/m)$$

Mit zunehmender Dauer der Starkbebenphase nähert sich der Setzungswert des Falls 2 an den des Falls 1 an.

Nach Zuordnung des Sicherheitserdbebens zum Referenzszenario /BEU 12/ wurde der Fall Erdbeben in die Vorbemessung mit aufgenommen. Dazu ist die Kenntnis der dynamischen Elastizitätsmoduln für den Schotter und die Filtermaterialien erforderlich, um die Setzungen in Folge Erdbeben abzuschätzen. Nach /SMO 88/ besteht der in Abb. 7.3 dargestellte materialspezifische Zusammenhang zwischen den Elastizitätsmodulen und dem Steifemodul E_s . Der Steifemodul errechnet sich aus dem statischen Elastizitätsmodul nach Gl. (7.21).

$$E = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \cdot E_s \quad (7.21)$$

E	statischer Elastizitätsmodul
ν	Querkontraktionszahl
E_s	Steifemodul

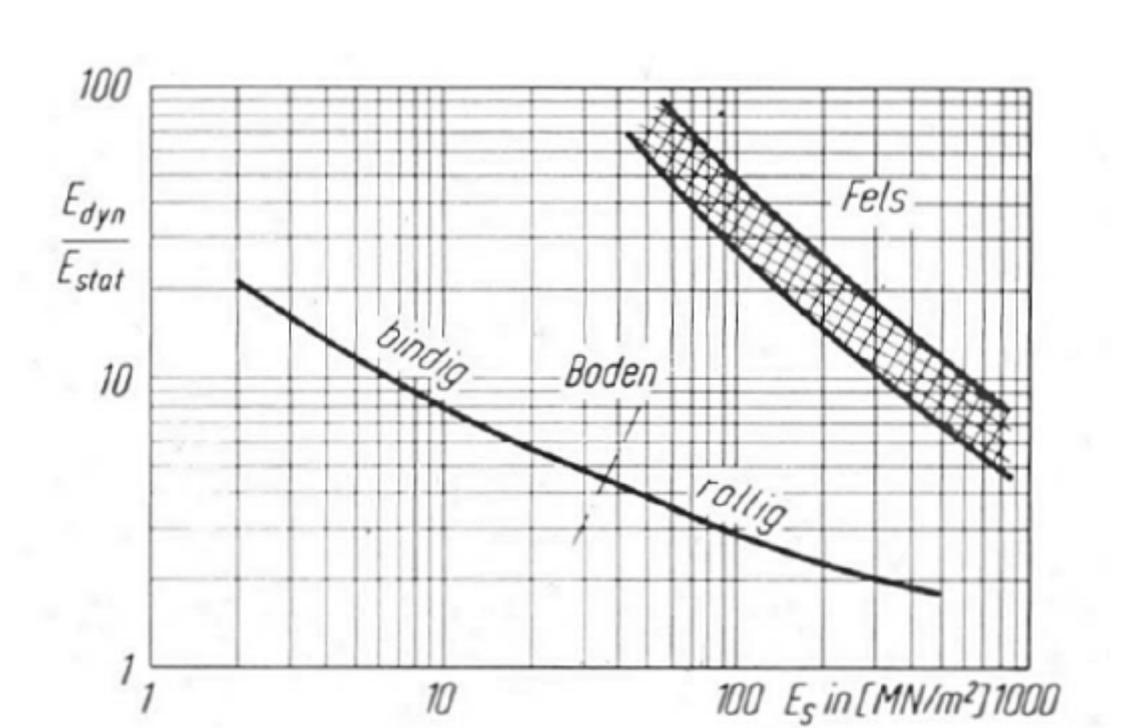


Abb. 7.3 Zusammenhang zwischen dem Quotienten des dynamischen und des statischen Elastizitätsmoduls und dem Steifemodul /SMO 88/

Kiese, Sande und Schotter werden als rolliger Boden eingestuft. Der Steifemodul für Kiese und Sande errechnet sich aus den Angaben in Tab. 7.10 zu 170 MN/m^2 , für den Schotter zu 220 MN/m^2 , woraus sich unter Anwendung des in Abb. 7.3 angegebenen Zusammenhanges dynamische E-Moduln von 370 MN/m^2 und 460 MN/m^2 abschätzen lassen.

Das für die Setzung der Filterschicht und der Schottersäule zusätzlich zu berücksichtigende Sicherheitserdbeben ist durch die folgenden seismologischen Kenndaten definiert /WOL 12/:

- Standortintensität: $7,3 \text{ (MSK)}$
- Horizontale Beschleunigung: $a_h = 1,4 \text{ m/s}^2$
- Vertikale Beschleunigung: $a_v = 0,7 \text{ m/s}^2$
- Dauer der Starkbebenphase über Tage: $t_0 = 7,0 \text{ s}$
- Dauer der Starkbebenphase unter Tage: $t_0 = 3,0 \text{ s}$

Im Rahmen der Vorbemessung wird das Erdbeben pseudo-statisch behandelt. Dabei wird von folgenden ungünstigen Annahmen ausgegangen:

Das Erdbeben tritt zu einem frühen Zeitpunkt ein, so dass die konvergenzbedingte Einspannung der das Bentonitdichtelement tragenden Filterschicht und Schottersäule noch gering ist. Konservativ wird deshalb davon ausgegangen, dass der Kontakt zwischen Filterschicht sowie Schottersäule und der Schachtwandung durch die Erdbebenbeschleunigung für die Dauer der Starkbebenphase vollständig aufgehoben wird. Für den Steifemodul bzw. den Elastizitätsmodul werden die abgeleiteten dynamischen Kennwerte zu Grunde gelegt.

Als Belastung wird der vollständige Überlagerungsdruck mit Ausnahme des erst nach längerer Zeit auftretenden Meeresspiegelanstiegs wirksam, d. h., der Druck p_0 beträgt ca. 10 MPa (9,51 MPa an der OK der Filterschicht, 9,77 MPa an der OK der Schottersäule). Das Eigengewicht der Schottersäule wird vereinfacht vernachlässigt. Der Druck an der OK wird in eine flächenbezogene Ersatzmasse $m = p_0/g = 10/9,81 \text{ Mkg/m}^2 = 1,02 \text{ Mkg/m}^2$ umgerechnet. Die flächenbezogenen Ersatzfederkonstanten für die Filterschicht und die Schottersäule ergeben sich mit den dynamischen Elastizitätsmoduln $E_{\text{dyn,Filter}} = 370 \text{ MN/m}^2$ und $E_{\text{dyn,Schotter}} = 460 \text{ MN/m}^2$ gemäß Gl (7.16) zu $c_{\text{Filter}} = 370/14 = 26,4 \text{ MN/m}^3$ und $c_{\text{Schotter}} = 460/190 = 2,42 \text{ MN/m}^3$.

Bei Zugrundelegung des Falls 1 ergibt sich daraus für die Setzung der Filterschicht und der Schottersäule

$$x_{\text{Filter}} = 1,02 \cdot (9,81 + 0,7) / 26,4 = 0,41 \text{ m}$$

$$x_{\text{Schotter}} = 1,02 \cdot (9,81 + 0,7) / 2,42 = 4,43 \text{ m}$$

in Summe also 4,84 m.

Bei Zugrundelegung des Falls 2 ergeben sich

$$x_{\text{Filter}} = (9,81 + 0,7) / (2/3^2 + 26,4/1,02) = 0,40 \text{ m}$$

$$x_{\text{Schotter}} = (9,81 + 0,7) / (2/3^2 + 2,42/1,02) = 4,05 \text{ m}$$

in Summe also mit 4,45 m nahezu gleiche Werte wie im Fall 1. Eine so große Setzung ist auch für das 60 m mächtige Bentonitdichtelement bei Ansatz des Orientierungswertes von 3 % Auflockerung als zu hoch einzustufen.

Deshalb wird unterhalb der Filterschicht ein gebirgsverbundenes, dräniertes Widerlager aus Salzbeton Typ Asse eingebracht, so dass die zusätzlichen Setzungen, die sich in Folge Erdbeben rechnerisch ergeben, auf 0,41 m beschränkt bleiben. Die Gesamtsetzung aus Kapitel 7.2.2.3 und 7.2.2.4 für das Filterelement beträgt damit maximal $0,27 + 0,41 = 0,68$ m.

Die erforderliche Widerlagerlänge für das zusätzliche gebirgsverbundene dränierte Widerlager, das die Erdbebenbelastung aus dem Überlagerungsdruck, dem Bentonitdichtelement und der Filterschicht aufnehmen muss, beträgt gemäß Gl. (7.6) und Gl. (7.7) 11,79 m. Gewählt wird eine Widerlagerlänge von 12,5 m.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mögliche Setzungen des 1. Dichtelementes aus Bentonit durch die Anordnung des zusätzlichen, dränierten Widerlagers soweit beschränkt bleiben, dass ein durch Auflockerung induzierter Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen durch das Bentonitdichtelement auch im Falle der zusätzlichen Einwirkung Erdbeben ausgeschlossen werden kann.

7.3 Hydraulische Vorbemessung des Schachtverschlusses

7.3.1 Hydraulischer Druck der Deckgebirgsässer

Die Einwirkung hydraulischer Druck der Deckgebirgsässer stellt die primär zu beherrschende Einwirkung für das Verschlussystem dar, um die Frage zu beantworten, ob das Verschlussystem geeignet ist, das Entwurfsziel „kein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen“ zu erfüllen. Für die Dichte der Lösungssäule wird vereinfachend und konservativ gesättigte NaCl-Lösung mit einer Dichte von 1.200 kg/m^3 und einer dynamischen Viskosität von $1,5 \text{ mPa s}$ angenommen, wobei die Höhe der Lösungssäule um 50 m erhöht wird, um einen klimabedingten Meeresspiegelanstieg zu berücksichtigen. Der hydraulische Druck an der Oberkante des Bentonitdichtelements beträgt somit $5,13 \text{ MPa}$.

7.3.2 Vorgehensweise bei der hydraulischen Vorbemessung

Im Rahmen der hydraulischen Vorbemessung wird analog zur Vorgehensweise bei der geochemischen und mechanischen Vorbemessung geprüft, ob das Verschlussystem unter den wahrscheinlichen Bedingungen der ständigen Bemessungssituation das Entwurfsziel erreicht. Die für diesen Fall verwendeten Rechenmodelle beruhen auf einfachen analytischen Ansätzen, vgl. /MÜL 12b/. Es erfolgt

- die Abschätzung der Durchtrittszeit von Salzlösung durch das Bentonitdichtelement,
- die Abschätzung des Durchflussvolumens durch das Bentonitdichtelement und
- die Ermittlung der Zeitdauer bis zur Auffüllung des anschließenden Speichervolumens

mit dem Ziel der Gewährleistung einer ausreichenden zeitlichen Verzögerung des Druckaufbaus von Salzlösung vor den Streckenverschlüssen zu den Einlagerungsbereichen, so dass die Salzgruskompaktion ausreichend weit fortgeschritten ist, vgl. Kapitel 5.

Zunächst wird die Durchtrittszeit der Lösung durch das Bentonitdichtelement bestimmt.

Grundlage ist die Gleichung zur Berechnung des durch ein poröses Material durchströmenden Flüssigkeitsvolumens pro Zeiteinheit auf Basis des Gesetzes von Darcy, siehe z. B. /WAG 05/. Für die Zeit, bis die Flüssigkeitsfront die andere Seite eines Längenelementes erreicht hat, gilt:

$$t = \frac{n \cdot (1 - S) \cdot \eta}{k \cdot p} \cdot \frac{L^2}{2} \quad (7.22)$$

t	Durchtrittszeit
n	Porosität
S	Sättigung
η	Viskosität der Flüssigkeit
k	Permeabilität
p	Flüssigkeitsdruck auf die Stirnfläche
L	hydraulisch wirksame Länge

Nach Aufsättigung errechnet sich die stationäre Durchflussrate mittels des Filtergesetzes von Darcy. Es wird ermittelt, welche Zeit benötigt wird, um das Volumen der Schot-

tersäule aufzufüllen, wenn dieses näherungsweise als abgeschlossenes Speichervolumen angenommen wird; eine Annahme, die durch den gegenüber dem Bentonitdichtelement signifikant höheren hydraulischen Widerstand des Salzbetondichtelements und dem lange Zeit nur geringen hydraulischen Druck auf das Salzbetondichtelement begründet ist.

Für den stationären Volumenstrom \dot{V} gilt

$$\dot{V} = \frac{k \cdot A \cdot p}{\eta \cdot L} \quad (7.23)$$

- k Permeabilität
- A Querschnittsfläche
- p Flüssigkeitsdruck auf die Stirnfläche
- η Viskosität der Flüssigkeit
- L hydraulisch wirksame Länge

Sowie für die Transportgeschwindigkeit \dot{v}

$$\dot{v} = \frac{k \cdot p}{\eta \cdot L} \quad (7.24)$$

Unter Nutzung von Gl. (7.22) und den in Tab. 7.11 angegebenen hydraulischen Kennwerten ergibt sich eine Durchtrittszeit von 172 Jahren. Danach stellt sich bei einem Durchmesser des Schachtes inkl. Nachschnitt von 8,63 m gemäß Gl. (7.23) ein stationärer Volumenstrom von 1,32 m³/a ein. Dieser benötigt rechnerisch 1.500 Jahre, um das in der Schottersäule vorhandene Speichervolumen von 2.000 m³ aufzufüllen.

Tab. 7.11 Ausgewählte Kenngrößen für das hydraulische Verhalten /MÜL 12a/, /ENG 11a/

Kenngröße		Bentonitdichtelement	Schottersäule
Wirksame Länge	[m]	50	190
Wirksamer Durchmesser	[m]	8,83 (inkl. Rest-ALZ)	7,63
Porosität	[-]	0,27*	0,23*
Anfangssättigung	[%]	45	~0
Permeabilität	[m ²]	1E-17	sehr groß

*Untergrenzen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der intakte Schachtverschluss eine hinreichende Verzögerung des Zutritts von Salzlösung bewirkt, so dass die Salzgruskompaktion in den Einlagerungsbereichen soweit fortgeschritten ist, dass kein advektiver Lösungstransport im Salzgrus mehr erfolgt, vgl. Kapitel 5. Da der intakte Schachtverschluss allein in der Lage ist, den Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu unterbinden, wird der Fall Versagen des Streckenverschlusses im Rahmen der Vorbemessung nicht betrachtet.

7.4 Plausibilitätsbetrachtung zur Vorbemessung der Streckenverschlüsse (Grundlage Strömungsbarrieren Asse)

Die Strömungsbarrieren (SB) in der Asse waren darauf ausgelegt, bedingt durch das damalige Schließungskonzept der GSF nach 2-3 Jahren Standzeit einseitigen Druck bis zu 1 MPa sowie innerhalb von weiteren 3 Jahren – bei vergleichsweise hohen Druckaufbauraten (Lösung) von bis zu 2 MPa pro Jahr – 5 MPa und nach 30 – 100 Jahren Drücke von bis zu 12 MPa zu ertragen. Bedingt durch das damalige Konzept der Schutzfluideinleitung wurden allerdings nur geringe Differenzdrücke von weniger als 1 MPa erwartet /GSF 07a/, /GSF 07b/, /GSF 07c/, /GSF 07d/. Für den Entwurf der Streckenverschlüsse wird davon ausgegangen, dass bedingt durch die Salzgruskompaktion diese Gegebenheiten für die Streckenverschlüsse vergleichbar oder konservativ sind, was aber im Rahmen der vertieften Nachweisführung /MÜL 12c/ noch zu belegen ist.

8 Beschreibung des modifizierten Entwurfs für den Schachtverschluss

Auf Grundlage der Ergebnisse der Vorbemessung wird der in Abb. 3.2 dargestellte und in Tab. 3.1 angegebene Funktionsentwurf des Schachtverschlusses modifiziert (Abb. 8.1). Der Entwurf des modifizierten Schachtverschlusses ist Grundlage für die vertiefte Nachweisführung /MÜL 12c/. Die Streckenverschlüsse bleiben unverändert.

Die Modifikationen des Schachtverschlusses sind in Tab. 8.1 und Tab. 8.2 aufgeführt und durch rote Schrift gekennzeichnet. Die Begründungen für die Modifikationen sind nachstehend zusammengefasst.

- Zusätzlich eingeführt wird ein gebirgsverbundenes dräniertes Widerlager zur Beherrschung der Einwirkung Erdbeben. Zusätzlich eingeführt wird eine Opferschicht zur Beherrschung des Korrosionspotenzials.
- Zusätzlich eingeführt wird ein deckgebirgsseitiges Widerlager vor dem Salzbetondichtelement zur Beherrschung des deckgebirgsseitigen Lösungsdrucks. Die grubenseitige Widerlagerlänge wird verringert. Aufgrund der Lage der Gorleben-Bank, die sich möglichst in der Mitte der Dichtelemente befinden soll, besteht eine Beschränkung in der Positionierung von Dicht- und Widerlagerelementen, so dass sich daraus insgesamt eine Vergrößerung der Gesamtlänge des 2. Dichtelementes und seiner Widerlager aus Salzbeton von 100 m auf 120 m ergibt, vgl. Abb. 8.1.
- Die Dicke der Langzeitdichtung wird auf 50 m vergrößert und wird an die Größe der Sicherheitsabstände mit Sicherheitszuschlag zum Anhydrit angepasst.

Aufgrund der genannten Modifikationen verkürzt sich die Länge der Schottersäule auf 127,5 m, so dass sich ihr Speichervolumen auf ca. 1.500 m³ reduziert. Es lässt sich leicht abschätzen, dass bereits die Auffüllung des verbliebenen, ersten Speichervolumens immer noch mehr als 1.000 Jahre dauert (siehe Abschnitt 7.3.2). Unter Berücksichtigung der weiteren vorhandenen Speichervolumina steht somit ausreichend Zeit für die Salzgruskompaktion zur Verfügung, vgl. Kapitel 5.

Auch in Bezug auf die geochemische Vorbemessung ist zu beachten, dass sich aufgrund des veränderten Speichervolumens die Mg²⁺-Konzentration verändert. Da jedoch bei den geochemischen Analysen zur Ermittlung der maximal korrodierbaren Salzbe-

tonmasse die maximal vorhandene Menge an Mg^{2+} -Ionen zu Grunde gelegt wurde, ist die Verringerung des Reservoirvolumens für das Ergebnis ohne Belang.

Der als Resultat der Vorbemessung modifizierte Funktionsentwurf gemäß Abb. 8.1 und Tab. 8.1 und Tab. 8.2 wird der weiteren Planung zugrunde gelegt. Er dient zur Ermittlung des Druckaufbaus an den Funktionselementen. Zur Ableitung des Druckaufbaus an den Verschlusselementen wird eine separate hydraulische Vorbemessung durchgeführt.

Weiterhin ist geplant, die Verfüllsäule oberhalb des Bentonitdichtelementes gezielt aufzusättigen, um hohe Druckaufbauraten auf das trockene Bentonitdichtelement auszu-schließen, die sonst bedingt durch die hohe Lieferfähigkeit einzelner Grundwasserleiter des Deckgebirges betrachtet werden müssten.

Anmerkung:

Bei der Anbindung des geplanten Infrastrukturbereichs der Einlagerungssohle an den Schacht Gorleben 1 wurde festgestellt, dass diese nur im Teufenniveau 880 m erfolgen kann, wenn man die bisherigen Erkundungsergebnisse zu Grunde legt. Dieser Sachverhalt beeinflusst das Verhalten des Schachtverschlusses nur geringfügig und wird deshalb vorläufig vernachlässigt, siehe dazu Anhang C.

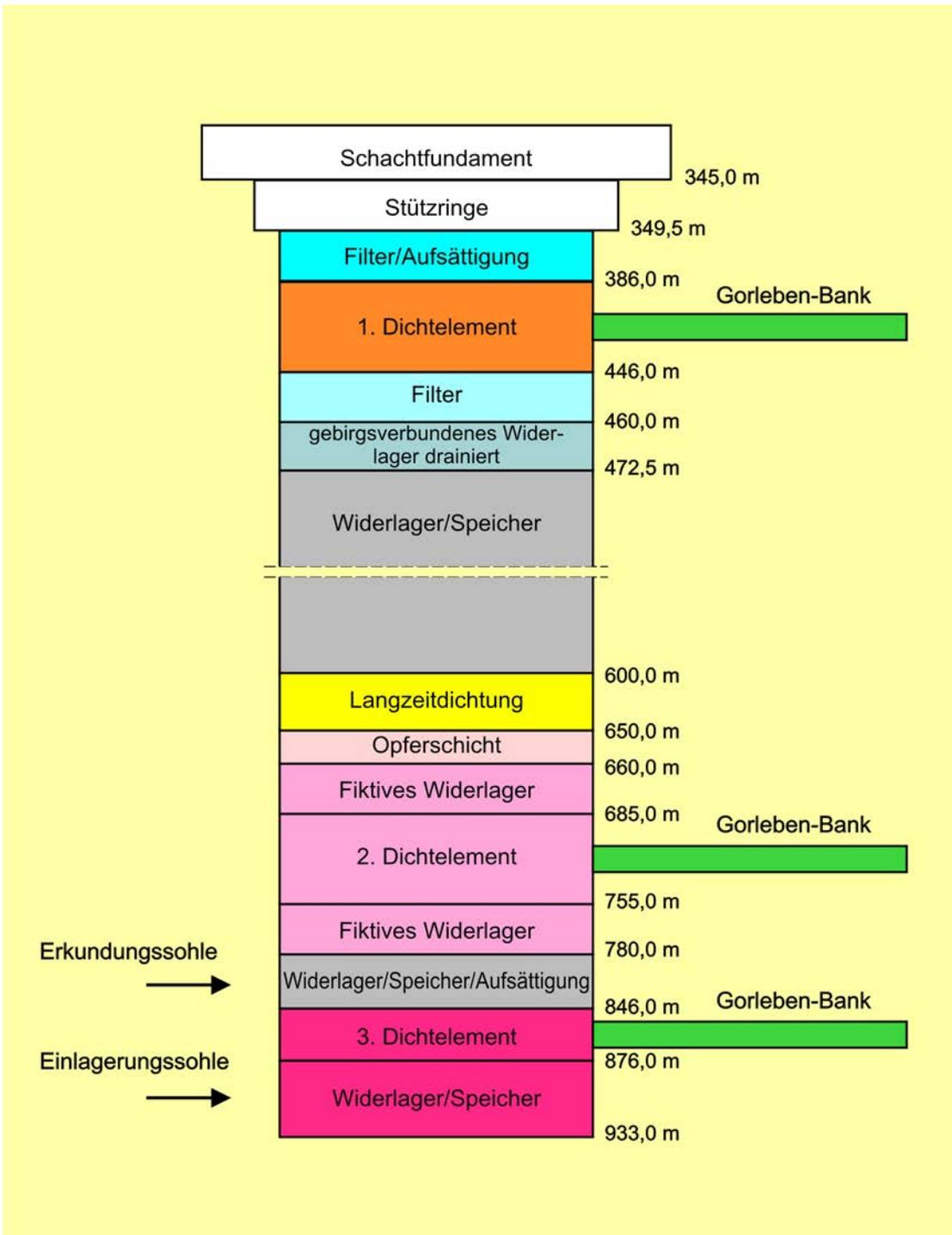


Abb. 8.1 Funktionsentwurf Schachtverschluss Gorleben 1 (nach Vorbemessung)

Im Niveau der Erkundungs- und der Einlagerungssohle sind unter dem Begriff Speicher die angeschlossenen Infrastrukturräume mit erfasst.

Tab. 8.1 Geometrische Angaben zum modifizierten Funktionsentwurf
(Modifikationen rot gekennzeichnet)

Funktionselement	Material	Dicke alt	Dicke neu	Teufe OK
Filter/Aufsättigung	Sand/Kies/Basalt-splitt	36,5 m	36,5 m	349,5 m
1. Dichtelement	Bentonit	60 m	60 m	386,0 m
Filter	Sand/Kies/Basalt-splitt	14 m	14 m	446,0 m
Gebirgsverbundenes Widerlager dräniert	Salzbeton	-	12,5 m	460 m
Widerlager/Speicher	Basaltschotter	190 m*	127,5 m*	472,5 m
Langzeitdichtung	Feuchter Salzgrus	30 m	50 m	600,0 m
Opferschicht	Salzbeton	-	10 m	650,0 m
Fiktives Widerlager	Salzbeton	-	25 m	660,0 m
2.Dichtelement	Salzbeton	60 m	70 m	685,0 m
Fiktives Widerlager	Salzbeton	40 m	25 m	755,0 m
Widerlager/ Speicher/ Aufsättigung / ggf. Behelfswiderlager	Basalt-/ Serpen- tinitschotter, techn. Bischofit	66 m	66 m	780,0 m
3.Dichtelement	Sorelbeton	30 m	30 m	846,0 m
Widerlager	Sorelbeton	57 m	57 m	876,0 m

* Annahme: Gorleben-Bank in diesem Bereich nicht hydraulisch wirksam angeschlossen

Tab. 8.2 Vergleich geometrischer und wirksamer Größen des modifizierten Funktionsentwurfes (Modifikationen rot gekennzeichnet)

Funktions- element	Material	Geom. Länge	Wirks. Länge	Geom. Ø	Wirks. Ø	Anmerkun- gen
Fil- ter/Aufsättigung	Sand/Kies/ Basaltsplitt	36,5 m	36,5 m	7,63 m	7,63 m	
1. Dichtelement	Bentonit	60 m*	50 m*	8,63 m	8,83 m	10 cm Rest- ALZ, 1 % Porosität
Filter	Sand/Kies/ Basaltsplitt	14 m	14 m	7,63 m	7,63 m	
Gebirgsverbun- denes Widerlager dräniert	Salzbeton	12,5 m	12,5 m	8,63 m	8,63 m	Kein hydrau- lischer Wi- derstand
Widerla- ger/Speicher	Basaltschot- ter	127,5 m	127,5 m	7,63 m	7,63 m	
„Langzeitdich- tung“	Feuchter Salzgrus	50 m	50 m	7,63 m	7,63 m	
Opferschicht	Salzbeton	10 m	10 m	7,63 m	7,63 m	Ansatz er- höhter Per- meabilität
Fiktives Widerla- ger	Salzbeton	25 m	25 m	8,83 m	8,83 m	10 cm Rest- ALZ, o. A.
2.Dichtelement	Salzbeton	70 m*	60 m*	8,83 m	9,03 m	10 cm Rest- ALZ, 1 % Porosität
Fiktives Widerla- ger	Salzbeton	25 m	25 m	8,83 m	8,83 m	10 cm Rest- ALZ, o. A.
Widerlager/ Speicher/ Aufsättigung/ ggf. Behelfswi- derlager	Basalt-/ Serpentinit- schotter, techn. Bi- schofit	66 m	66 m	fiktiv 7,63 m	-	Anschluss Infrastruktur
3.Dichtelement	Sorelbeton	30 m*	20 m*	9,23 m	9,43 m	10 cm Rest- ALZ, 1 % Porosität
Widerlager	Sorelbeton	57 m	57 m	fiktiv 7,63 m	-	Anschluss Infrastruktur

o. A ohne hydraulische Anforderungen, Nachschnitt erfolgt aus Gründen der Tragfähigkeit

* Berücksichtigung der Gorleben-Bank bei der wirksamen Länge

9 Bauablauf/Leistungsansätze

Für das modifizierte Verschlussystem, das vorbemessen ist, ergibt sich bei Zugrundelegung realistischer Leistungsansätze eine Bauzeit von insgesamt ca. 6,5 Jahren. Die Bauzeit enthält die Dauern für das Rauben von Einbauten, Aufbau und Abbau von temporären Arbeitsbühnen einschließlich Bereitstellung von Misch- und Fördereinrichtungen für Baumaterial sowie Dauern für den Einbau und Rückbau der Schachtfraße zur Durchführung des Nachschnitts zwecks Entfernung der Auflockerungszone. Der geplante Bauablauf ist in Tab. 9.1 angegeben. Dieser wird hier für die vertiefte Nachweisführung /MÜL 12c/ bereitgestellt.

Tab. 9.1 Erstellung Verschlussystem – Bauablauf

Datum	Dauer (Monate)	Ereignis	Anmerkungen
01.01.2035	480,00	Beginn Einlagerungsbetrieb	
01.01.2075	24,00	Ende Einlagerungsbetrieb, Beginn Rückbau	Rückbau Einbauten 1 Jahr, Streckenversatz (Salzgrus in Strecken) 1 Jahr Nach 2 Jahren: Beginn der Erstellung der Dichtelemente
31.12.2076	18	Beginn Verfüllung Infrastrukturbereich	
02.07.2078	5,5	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	
24.12.2078	0,25	Widerlager (Sorelbeton)	Beginn Errichtung des Schachtverschlusses in Schacht Gorleben 1
24.12.2078	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit \leq 3 Monate
25.03.2079	2,75	3. Dichtelement (Sorelbeton)	
23.09.2080	18,00	Widerlager/Speicher/Aufsättigung (Basalt-/Serpentinit-schotter, techn. Bischofit)	
23.09.2080	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	
09.03.2081	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit \leq 3 Monate
09.06.2081	2,75	Widerlager (Salzbeton)	
09.06.2081	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit \leq 3 Monate

Datum	Dauer (Monate)	Ereignis	Anmerkungen
08.09.2081	2,75	2. Dichtelement (Salzbeton)	
08.09.2081	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit ≤ 3 Monate
08.12.2081	2,75	Widerlager (Salzbeton)	
16.12.2081	0,25	Opferschicht (Salzbeton)	
16.12.2081	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	
01.11.2082	5,00	Langzeitdichtung (Feuchter Salzgrus)	
01.11.2082	5,50	Einkürzen Schächte	
17.10.2083	6,00	Widerlager/Speicher (Basaltschotter)	
17.10.2083	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	
01.04.2084	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit ≤ 3 Monate
01.07.2084	2,75	Gebirgsverbundenes Widerlager dräniert (Salzbeton)	
16.08.2084	1,50	Filter (Sand/Kies/ Basaltsplitt)	
16.08.2084	5,50	Einkürzen/Ausrauben der Schachteinbauten	
30.01.2085	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit ≤ 3 Monate
09.05.2085	3,00	1. Dichtelement (Bentonit) 1. Bauabschnitt	
09.05.2085	0,25	Nachschnitt	Freie Standzeit ≤ 3 Monate
16.08.2085	3,00	1. Dichtelement (Bentonit) 2. Bauabschnitt	
01.12.2085	3,50	Filter/Aufsättigung (Sand/Kies/ Basaltsplitt)	
31.12.2085	1,00	Beginn Druckaufbau	Hydraulischer Druckaufbau durch gezielte Aufsättigung der Verfüllsäule im Deckgebirge

10 Vertiefte hydraulische Vorbemessung des Verschluss-systems

Für das modifizierte Verschlussystem wird eine über die Betrachtungen von Kapitel 7.3 hinausgehende vertiefte hydraulische Vorbemessung durchgeführt. Die hydraulische Vorbemessung besitzt zwei Schwerpunkte. Zuerst wird geprüft, ob das Verschlussystem unter den wahrscheinlichen Bedingungen der ständigen Bemessungssituation das Entwurfsziel erreicht. Anschließend werden die wenig wahrscheinlichen Bedingungen der außergewöhnlichen Bemessungssituation Schachtverschlussversagen untersucht (vgl. die Ergebnisse der Szenarientwicklung in /BEU 12/), um zu prüfen, ob das Verschlussystem auch bei Schachtverschlussversagen prinzipiell in der Lage ist, einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu unterbinden. Es erfolgen

- (1) die hydraulische Modellierung des intakten Schachtverschlusses unmittelbar nach Errichtung des Verschlusses,
- (2) die hydraulische Modellierung des Schachtverschlusses bei Schachtverschlussversagen und
- (3) die hydraulische Modellierung der intakten Streckenverschlüsse unter Berücksichtigung des Zuflusses in das Grubengebäude bei Schachtverschlussversagen.

Es ist zu prüfen, ob auch bei Schachtverschlussversagen eine ausreichende zeitliche Verzögerung des Anstehens von Salzlösung vor den Streckenverschlüssen gewährleistet ist, so dass die Salzgruskompaktion ausreichend weit fortgeschritten ist. Die Zeit für die Kompaktion des Salzgrusversatzes bis zu dessen hydraulischer Wirksamkeit wird im Sicherheitskonzept /MÖN 12/ mit maximal 1.000 Jahren angesetzt. Der ungünstigste Fall für ein Schachtverschlussversagen ist dann seine nicht anforderungsgerechte Errichtung /BEU 12/, da er in diesem Fall direkt nach Fertigstellung seine Funktion nicht erfüllt und dementsprechend die Salzgruskompaktion in den Zugangsstrecken erst in geringem Umfang erfolgt ist. Es wird dabei unterstellt, dass einer der beiden Schachtverschlüsse versagt.

Weiterhin dienen diese Modellierungen 1. – 3. zur Bestimmung des Druckes bzw. der Druckaufbauraten als innere Randbedingungen an einzelnen Dichtelementen, die im Rahmen der vertieften Nachweisführung /MÜL 12c/ detailliert untersucht werden.

10.1 Verwendetes Rechenprogramm

Für diese Berechnungen wird der Computercode LOPOS /HIR 99/ des Programmpakets EMOS eingesetzt, wobei eine Version verwendet wird, die die Berücksichtigung teufenabhängiger Volumenströme ermöglicht (Executable: lopos-7.09_b.exe) /BUH 12a/. Bei der Bewertung der Modellierungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass in LOPOS rechnerisch auch bei sehr geringen Permeabilitäten immer noch ein Lösungstransport errechnet wird, auch wenn er aus physikalischen Gründen bereits zum Erliegen gekommen ist /POP 12/.

10.2 Intakter Schachtverschluss (ständige Bemessungssituation)

10.2.1 Grundlagen

Das hier verwendete, modifizierte Schachtverschlusskonzept ist in Kapitel 8 beschrieben und in Abb. 8.1 dargestellt. In Tab. 10.1 sind die Kenndaten der verwendeten Komponenten zusammengestellt. Sie sind dem Bericht /MÜL 12a/ entnommen.

In Abb. 10.1 ist die für LOPOS erstellte Segmentstruktur des Schachtverschlusses gemäß Abb. 8.1 schematisch wiedergegeben. Die Längen der einzelnen Komponenten entsprechen den geometrischen Längen²⁴ des Schachtverschlusses gemäß Abb. 8.1. Die Opferschicht wurde mit dem zugehörigen Widerlager zusammengefasst. Der Infrastrukturbereich wurde nur auf der Einlagerungssohle berücksichtigt.

Das Filtersegment über dem 1. Dichtelement wird in den LOPOS-Rechnungen nicht als strömungswirksames Segment betrachtet. Vielmehr wird dieses Segment verwendet, um die Druckrandbedingung an der Oberkante des 1. Dichtelements zu gewährleisten, d. h., bei 386 m Modellteufe wird ein konstanter Außendruck von 5,1 MPa der darüber liegenden Lösungssäule unterstellt, wobei eine zusätzliche Überlagerung durch den (säkularen) Anstieg des Meeresspiegels von 50 m unterstellt wurde.

²⁴ Im Rahmen der LOPOS-Berechnungen wurde nicht zwischen wirksamer und geometrischer Länge der Dichtelemente unterschieden. Für das Verhalten des Gesamtsystems ist der Unterschied nur von geringer Bedeutung.

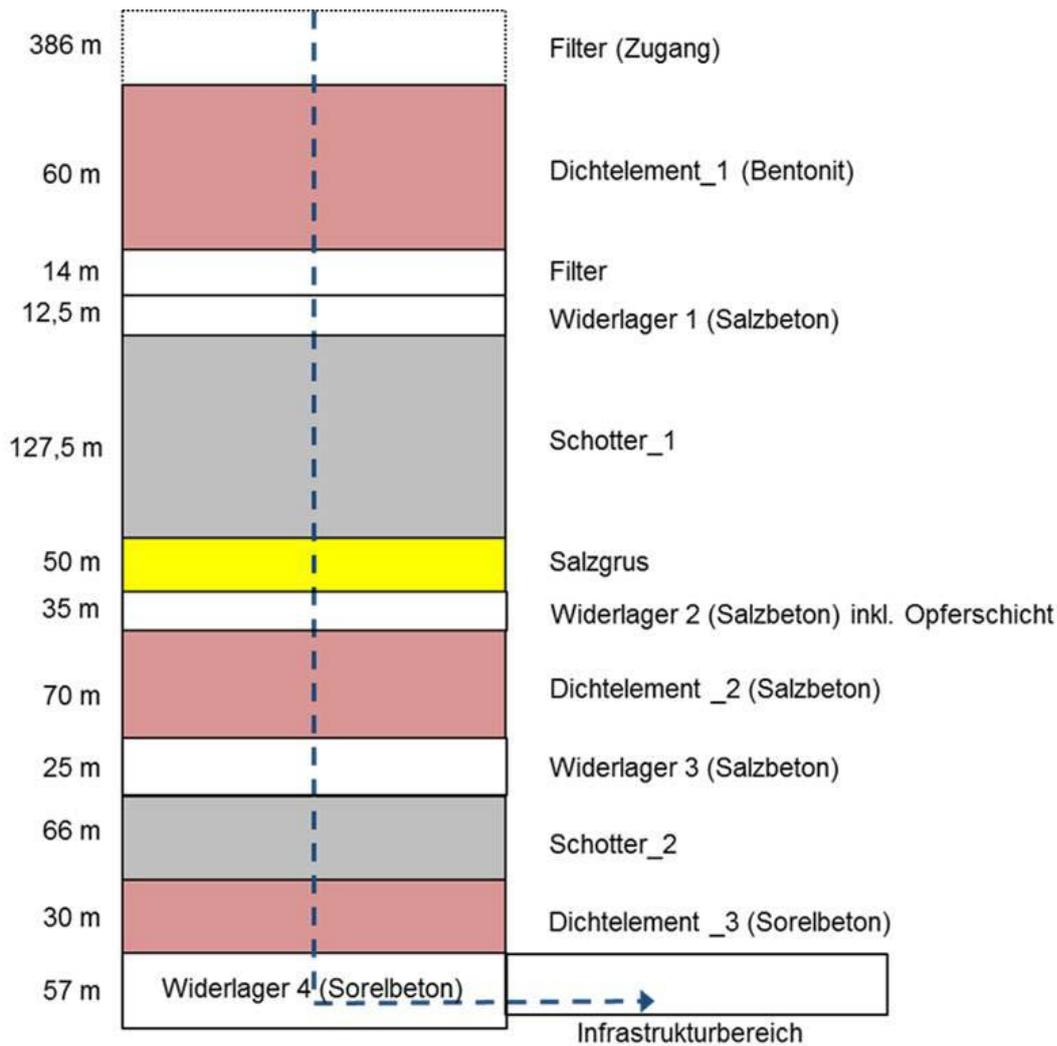


Abb. 10.1 Schematische Segmentstruktur für den Schachtverschluss (LOPOS-Modell)

Die Zahlenwerte geben die vertikale Länge der Segmente an.

Die Durchmesser der Modellsegmente wurden unter Berücksichtigung des Nachschnitts angenommen und liegen zwischen 7,63 m (ohne Nachschnitt) und 9,23 m (Sorelbeton-Dichtelement inklusive Nachschnitt, aber ohne die kurzzeitig neugebildete ALZ von 10 cm Tiefe). Die Durchmesser bzw. Volumina der Einzelsegmente beeinflussen die Rechenergebnisse nur geringfügig. Für den Infrastrukturbereich, der im Modell horizontal an das letzte Widerlager angebunden ist, wurde ein sehr großes Porenvolumen angenommen, um für die Rechnungen keinen nennenswerten Gegendruck durch Anstieg einer Lösungssäule berücksichtigen zu müssen.

Tab. 10.1 Kenndaten der Komponenten des Schachtverschlusses /MÜL 12a/

Funktionselement	Material	Permeabilität (Lösung) [m²]	Porosität
Filter/Aufsättigung	Basaltsplitt, ggf. Kies, Sand	$10^{-10} - 10^{-12}$	25-35%
1. Dichtelement	Bentonit	integral: $1 \cdot 10^{-17}$, Rest-ALZ (10 cm tief)	27-34%
Filter	Splitt, Kies, Sand	$10^{-10} - 10^{-12}$	25-35%
Widerlager 1 dräniert	Salzbeton	wie Schotter $10^{-10} - 10^{-12}$	wie Salzbeton
Speicher (Schotter 1)	Basalt-schotter	$10^{-7} - 10^{-9}$	23 oder 38%
Langzeitdichtung	Feuchter Salzgrus	$10^{-13} - 10^{-15}$ (Anfangspermeabilität)	10% (Anfangsporosität) *
Widerlager 2	Salzbeton	Salzbeton $2 \cdot 10^{-15}$	Salzbeton
2. Dichtelement	Salzbeton	integral: $7 \cdot 10^{-19}$, Rest-ALZ (10 cm tief)	10%
Widerlager 3	Salzbeton	Salzbeton wie Dichtelement, ALZ (60 cm tief) $2 \cdot 10^{-15}$	Salzbeton wie Dichtelement, ALZ (60 cm tief) 1%
Speicher (Schotter 2)	Basalt-/Serpentinit-schotter	$10^{-7} - 10^{-9}$	38%
3. Dichtelement	Sorelbeton	integral: $5 \cdot 10^{-17}$, Rest-ALZ (10 cm tief)	16 – 24% (Anfangsporosität, durch Quellen Reduktion)
Widerlager 4	Sorelbeton	Sorelbeton $5 \cdot 10^{-17}$	16 – 24% (Anfangsporosität, durch Quellen Reduktion)

* In den abschließenden Rechnungen ohne Konvergenz gerechnet, d. h., das Porenvolumen bleibt unverändert mit $k=1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$.

Die Anfangssättigung der Elemente des Schachtverschlusses (0: keine Anfangslösung im Segment; 1: voll gesättigt) wurde entsprechend den Angaben in /ENG 11b/ berücksichtigt (Tab. 10.2). Die angegebene Sättigung bezieht sich auf das Anfangsporenvolumen. Die Gesamt-Lösungsmenge im Schachtverschluss beträgt zu Beginn ca. 1.700 m^3 . In den Modellrechnungen mit LOPOS wird diese Lösungsmenge so berücksichtigt, dass ihr Volumen jeweils vom Porenvolumen abgezogen wird, um einen (numerisch bedingten) Abfluss dieser Anfangslösung in darunterliegende Segmente zu verhindern. Diese Modellierung ergibt in den folgenden Abbildungen ein kleineres An-

fangsporenvolumen als gemäß Tab. 10.2 zu erwarten und ein Anfangs-Lösungsvolumen von Null m³.

Die Permeabilität der Langzeitdichtung (Salzgrus) wurde als konstant angenommen, um die Interpretation der Rechenergebnisse zu erleichtern. Damit sich keine zeitliche Änderung der Gesamtdurchlässigkeit ergibt, wurde eine zu Porositäts- und damit Permeabilitätsabnahme führende Schachtkonvergenz bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Der Permeabilitätswertebereich von $10^{-13} - 10^{-15} \text{ m}^2$ ergibt sich aus der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung gemäß WIE 12/.

Der zeitliche Nullpunkt der Berechnungen mit LOPOS ist die Fertigstellung der Langzeitdichtung. Zur Vereinfachung der Rechnung wird angenommen, dass der Lösungszufluss von außen (Druckbeaufschlagung auf dem Bentonit-Dichtelement) bei der LOPOS-Modellzeit $t = 0 \text{ a}$ beginnt.

Tab. 10.2 Modelldaten (LOPOS) der Komponenten des Schachtverschlusses

Funktionselement	Länge [m]	Querschnitt [m ²]	Permeabilität [m ²]	Porosität	Anfangs-sättigung
Ausgangssegment (Filter/Aufsättigung)	436	5 x 5	$1 \cdot 10^{-12}$	30%	1
1. Dichtelement (Bentonit)	60	8 x 7,31	$1 \cdot 10^{-17}$	27%	0,45
Filter 1	14	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-12}$	25%	0,6
Widerlager 1	12,5	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-12}$	10%	0,85
Speicher (Schotter 1)	127,5	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-9}$	23%	0,065
Langzeitdichtung (Salzgrus)	50	7 x 6,53	gemäß PPB	10%**	0,29
Widerlager 2	35	8 x 7,65	$2 \cdot 10^{-15}$	10%	0,85
2. Dichtelement (Salzbeton)	70	8 x 7,65	$7 \cdot 10^{-19}$	10%	0,85
Widerlager 3	25	8 x 7,65	$2 \cdot 10^{-15}$	10%	0,85
Speicher (Schotter 2)	66	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-9}$	38%	0,065
3. Dichtelement (Sorelbeton)	30	8 x 8,36	$5 \cdot 10^{-17}$	16%***	0,8
Widerlager 4	57	8 x 8,36	$5 \cdot 10^{-17}$	16%***	0,8
Infrastruktur (horizontal)	1000	57 x 10*	$1 \cdot 10^{-14}$	40%	0

* Höhe wegen Anbindung an das Widerlager 4 gleich groß

** Anfangswert, der in den Rechnungen als konstant angesetzt wird

*** Konstanter Wert

Die Länge des Ausgangssegments ergibt sich aus einer Länge von 386 m über dem ersten Dichtelement plus 50 m Überdeckung durch den unterstellten Meeresspiegelanstieg. Die Permeabilität der Langzeitdichtung wurde – wie bereits erwähnt – in den Rechnungen als konstant angesehen. Auch für die Sorelbetondichtung wurden eine konstante Porosität und Permeabilität angenommen, d. h., es wurde keine Änderung durch Quellen und Konvergenz berücksichtigt. Die Eigenschaften der Salzlösung sind in Kapitel 7.3.1 beschrieben. Weitere Modelldaten können /BUH 12a/ entnommen werden.

10.2.2 Ergebnisse

In Abb. 10.2 und Abb. 10.3 sind die Lösungsvolumina in ausgewählten Schachtbereichen als Ergebnisse der Modellrechnungen dargestellt; in Abb. 10.2 für die oberen Schachtsegmente, in Abb. 10.3 für die unteren Segmente. In Abb. 10.4 und Abb. 10.5 sind die zeitlichen Druckverläufe für den gleichen Rechenfall dargestellt. Es wurde angenommen, dass für die Durchströmung der Komponenten die Permeabilitäten und die Porositäten jeweils den kleinsten Wert der Bandbreite nach Tab. 10.1 annehmen, vgl. Tab. 10.2. Diese Parameterwerte beeinflussen die Ergebnisse nur geringfügig.

Zufluss

Zu Beginn der Rechnung sind alle Segmente entsprechend der Anfangssättigung mit Lösung gefüllt, siehe auch Tab. 10.2. Der Zufluss aus dem Deckgebirge in den Schachtverschluss beginnt im Modell mit dem Zutritt in den Porenraum des 1. Dichtelements aus Bentonit. Dieser Porenraum ist nach 280 Jahren mit Lösung gesättigt. Die zutretende Lösung sickert weiter in die darunterliegenden Komponenten des Schachtverschlusses. Nach 280 Jahren sind die Porenräume des Widerlagers 2 und nach 440 Jahren diejenigen der Langzeitdichtung mit Lösung gesättigt. Kurz hintereinander nach 1.600 bis 1.740 Jahren sind die Porenräume im Filter, im Widerlager 1, in der Schottersäule und im Salzbeton-Dichtelement mit Lösung gesättigt.

Nachfließende Lösung aus dem Salzbeton-Dichtelement sickert durch das Widerlager 3 direkt in die 2. Schottersäule; das Widerlager 3 wird nur von sehr geringen Lösungsmengen gefüllt. Die 2. Schottersäule und das nachfolgende Sorelbeton-Dichtelement erreichen nach ca. 3.000 Jahren einen stationären Zustand; die zufließende Lösung wird direkt in den Infrastrukturbereich weitergeleitet. In diesen gelangen

über 100.000 Jahre Modellzeit ca. 10.000 m³ Lösung. Dieses konservative Modellierungsergebnis ist angegeben, um einen Eindruck der Größenordnung zu vermitteln.

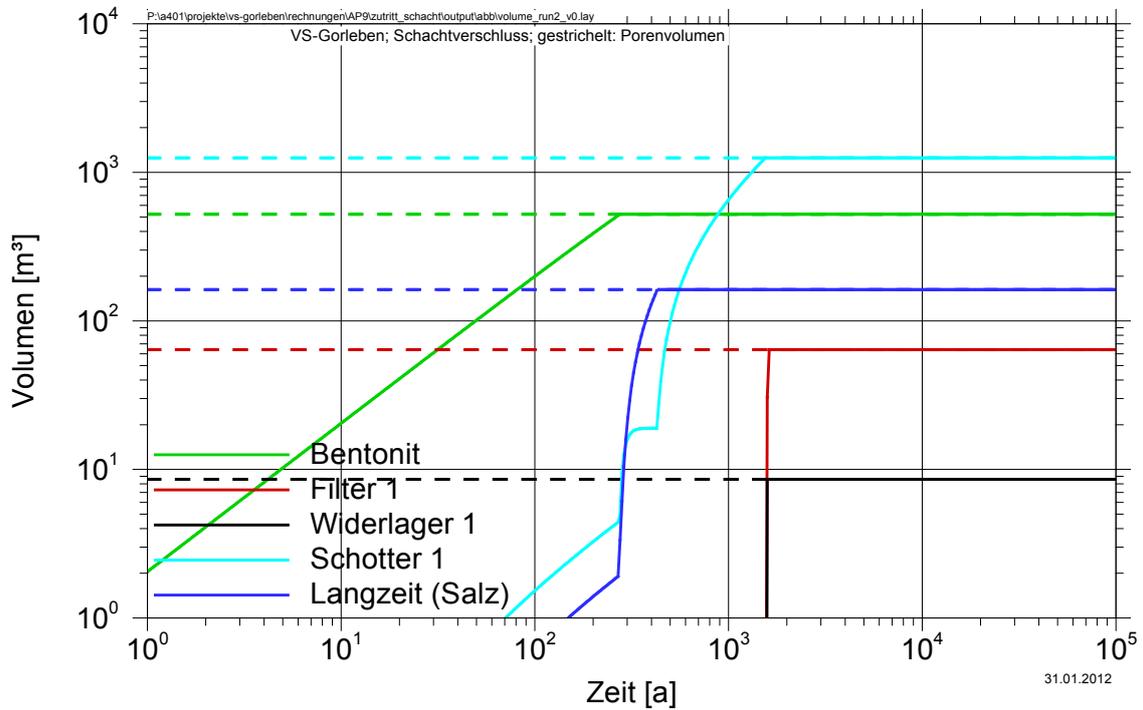


Abb. 10.2 Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; intakter Schachtverschluss

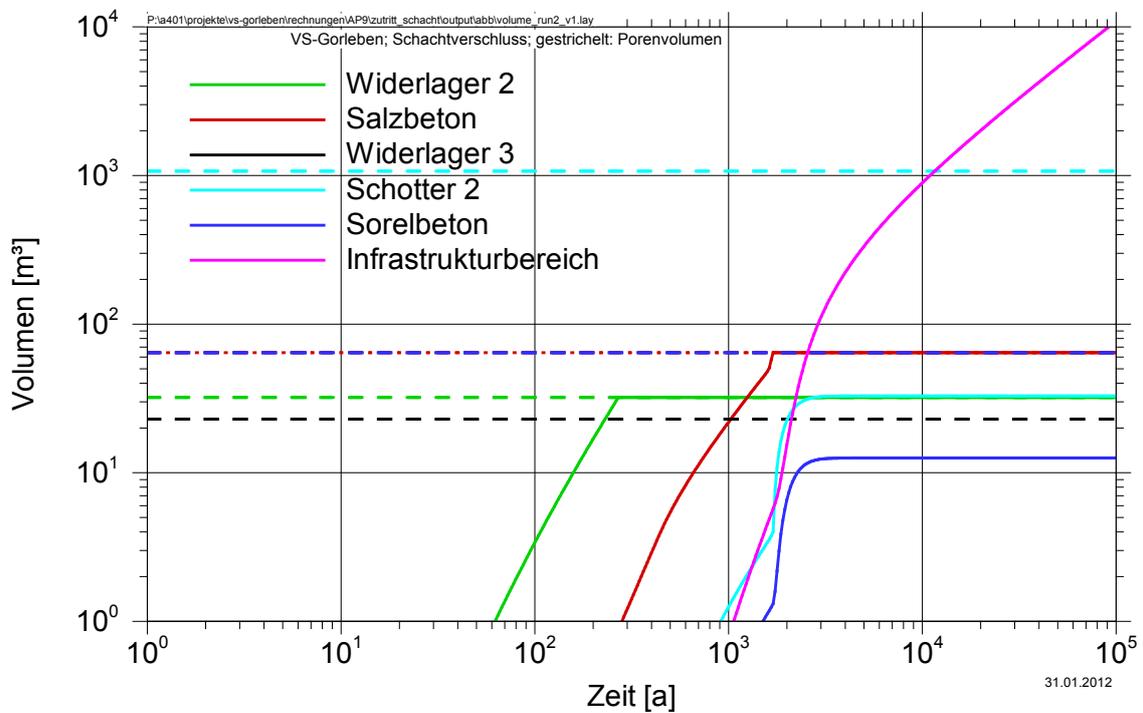


Abb. 10.3 Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; intakter Schachtverschluss

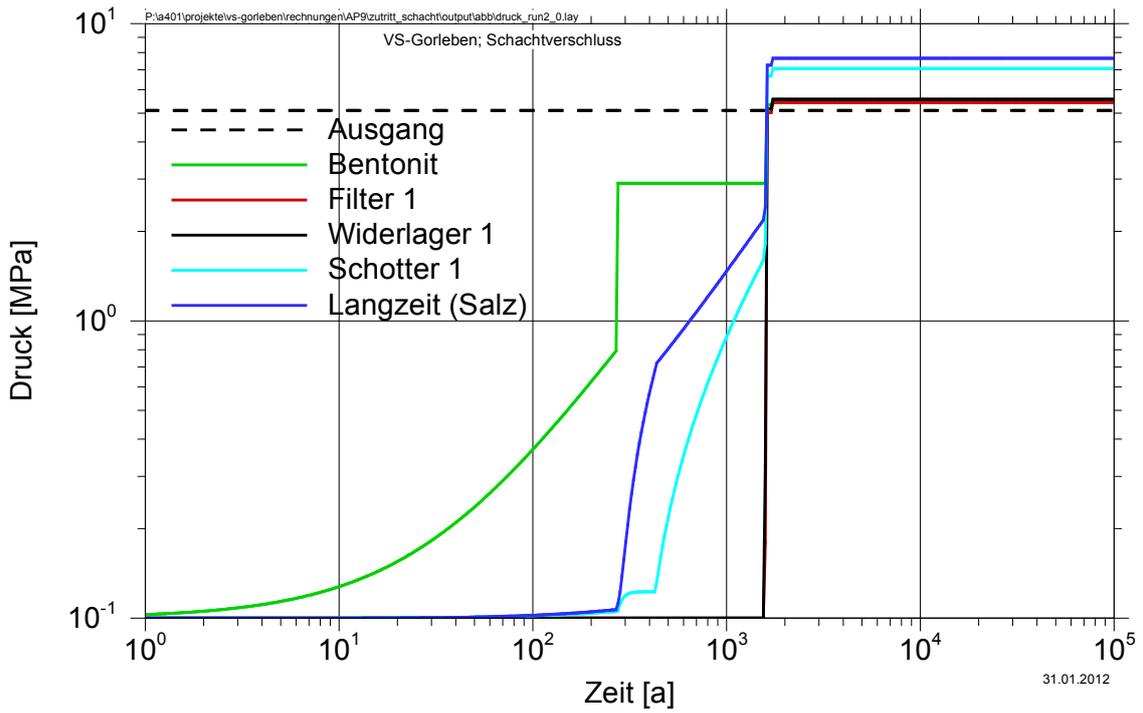


Abb. 10.4 Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; intakter Schachtverschluss

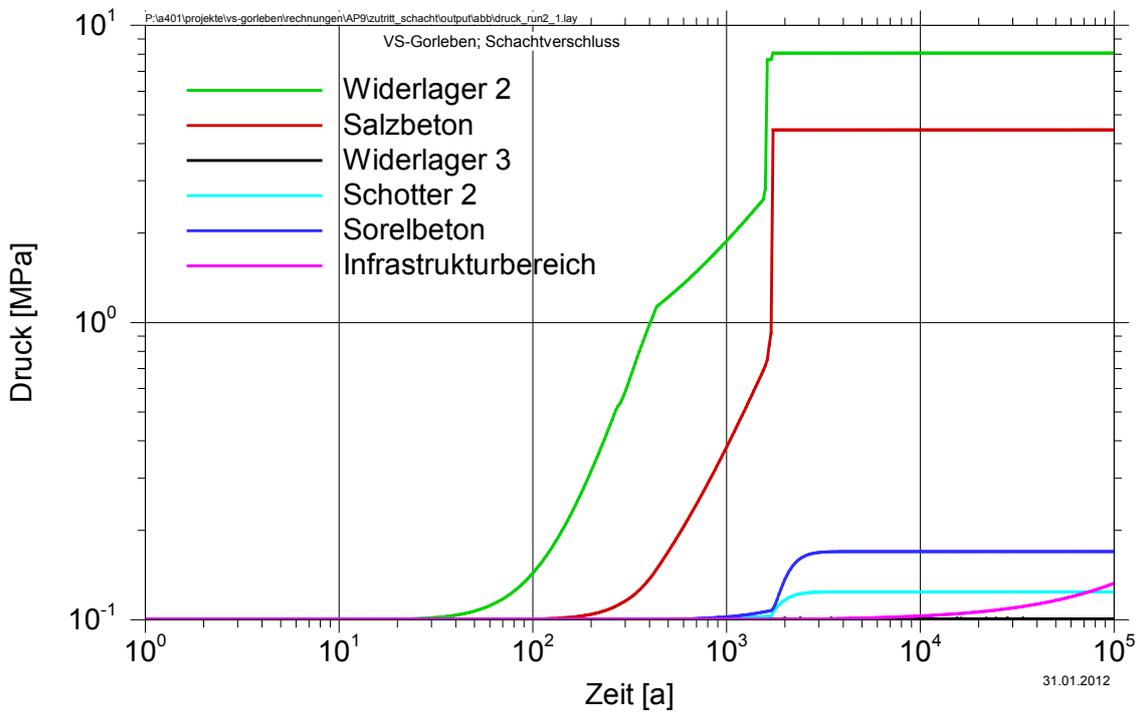


Abb. 10.5 Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; intakter Schachtverschluss

Druckentwicklung

Der Druck an der Oberkante des obersten Dichtelement (Bentonit) ist konstant und beträgt entsprechend 436 m Lösungssäule 5,1 MPa, Tab. 10.3. Nach dem Zeitpunkt der Auffüllung des Porenraums im Filter und der Schottersäule (1.600 Jahre) steigt der Druck im Bentonit auf 5,35 MPa. Dort und in allen anderen Komponenten oberhalb der Langzeitdichtung werden die Maximalwerte im Betrachtungszeitraum nach ca. 1.740 Jahren erreicht, sobald das Dichtelement aus Salzbeton mit Lösung gesättigt ist.

Tab. 10.3 Maximaldrücke und Zeitpunkte ihres Auftretens in den Komponenten des Modellverschlusses; intakter Schachtverschluss

Funktionselement	Maximaldruck [MPa]	Zeitpunkt [a]
Ausgang (über 1. Dichtelement)	5,1	(zeitlich konstant)
1. Dichtelement (Bentonit)	2,9 / 5,35 / 5,55	280 / 1.600 / 1.740
Filter	5,0 / 5,4	1.600 / 1.740
Widerlager 1 (unter Bentonit)	5,2 / 5,6	1.600 / 1.740
Speicher (Schottersäule 1)	6,7 / 7,1	1.600 / 1.740
Langzeitdichtung (Salzgrus)	7,25 / 7,65	1.600 / 1.740
Widerlager 2 (unter Salzgrus)	7,7 / 8,1	1.600 / 1.740
2. Dichtelement (Salzbeton)	4,4	1.740
Widerlager 3 (unter 2. Dichtelement)	0,1 *	(100.000)
Speicher (Schottersäule 2)	0,125	> 3.400
3. Dichtelement (Sorelbeton)	0,17	> 4.000
Widerlager 4 (unter 3. Dichtelement)	0,1 *	(100.000)
Infrastrukturbereich	0,13 *	(100.000)

*geringfügig ansteigend. Maximalwert noch nicht erreicht

In der Langzeitdichtung erreicht der Druck nach 440 Jahren ein lokales Maximum von 0,7 MPa, das durch das Erreichen der Sättigung dieses Segments verursacht wird. Nach der Auffüllung des Dichtelements aus Salzbeton nach 1.740 Jahren steigt dort der Druck auf einen Maximalwert von 4,4 MPa und in der darüber liegenden Langzeitdichtung auf 7,65 MPa sowie im 2. Widerlager auf 8,1 MPa an. In allen Komponenten unterhalb dieses Dichtelements (Salzbeton) verbleiben die Drücke während der gesamten Modellzeit unterhalb von 0,2 MPa.

10.2.3 Schlussfolgerungen zum Systemverhalten bei intaktem Schachtverschluss

Die oberhalb des Schachtverschlusses anstehenden Lösungen dringen im Lauf der Zeit in den Schachtverschluss entsprechend den Strömungswiderständen in die Komponenten ein. Gleichzeitig fließt Lösung aus den teilgesättigten Komponenten unterhalb des 2. Dichtelements (Salzbeton) in den Infrastrukturbereich. Die Zeitdauer bis zum Auffüllen der Porenvolumina unterhalb des ersten Dichtelements (Bentonit), d. h. im Filter und in der Schottersäule, beträgt ca. 1.600 Jahre.

Die Druckdifferenz über das erste Dichtelement (Bentonit) ist über die gesamte Modellzeit so gerichtet, dass oberhalb der höhere Druck herrscht. In der Zutrittsphase ist die Druckdifferenz maximal 5,0 MPa, entsprechend dem Druck oberhalb des Dichtelements und Atmosphärendruck unterhalb. Danach reduziert sich die Druckdifferenz auf minimal ca. 0,1 MPa. Ab ca. 1.740 Jahren baut sich ein höherer Druck in der Schottersäule und in der Langzeitdichtung auf. Die Druckdifferenz zum Widerlager 1 beträgt maximal 1,5 MPa, gemäß einem Druck von 7,1 MPa in der Schottersäule und 5,6 MPa im Widerlager 1.

Über das 2. Dichtelement (Salzbeton) beträgt die Druckdifferenz bis ca. 100 Jahre maximal 0,1 MPa, steigt danach stark an und beträgt nach 1.740 Jahren maximal 8,0 MPa. Der höhere Druck steht dabei jeweils oberhalb des Dichtelements an und unterhalb herrscht ungefähr Atmosphärendruck.

10.3 Schachtverschluss im Versagensfall (außergewöhnliche Bemessungssituation)

10.3.1 Grundlagen

Die geometrischen Abmessungen und das Modellkonzept sind identisch mit dem des intakten Schachtverschlusses, vgl. Kapitel 10.2.1 und /BUH 12b/. Auch die Modelldaten der Komponenten des Schachtverschlusses bleiben mit Ausnahme ausgewählter Permeabilitätswerte gleich. Die geänderten Modelldaten für den Berechnungsfall Schachtverschlussversagen sind in Tab. 10.4 aufgeführt und rot markiert.

Die ausgewählten Permeabilitätswerte wurden vergrößert, um die Bemessungssituation der nicht anforderungsgerechten Erstellung abzubilden. Sie sind wie folgt begründet:

Dichtelement Bentonit: Eine integrale Permeabilität von $5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ergibt sich im Mittel für einen mageren Ton, der ersatzweise für ein nicht ausreichend verdichtetes binäres Bentonitgemisch angesetzt wird (Kapitel 5.2 in /SCH 94/).

Dichtelement Salzbeton: Eine integrale Permeabilität von $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ lässt sich als Mittelwert aus Einzelmessungen am Asse-Vordamm ableiten, wenn der handverstopfte Bereich berücksichtigt und als fehlerhafte Erstellung interpretiert wird /EBE 09/.

Tab. 10.4 Modelldaten (LOPOS) der Komponenten des Schachtverschlusses bei Schachtverschlussversagen (Änderungen gegenüber dem intakten Schachtverschluss sind rot markiert)

Funktionselement	Länge [m]	Querschnitt [m ²]	Permeabilität [m ²]	Porosität	Anfangs-sättigung
Ausgangssegment (Filter/Aufsättigung)	436	5 x 5	$1 \cdot 10^{-12}$	30%	1
1. Dichtelement (Bentonit)	60	8 x 7,31	$5 \cdot 10^{-16}$	27%	0,45
Filter 1	14	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-12}$	25%	0,6
Widerlager 1	12,5	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-12}$	10%	0,85
Speicher (Schotter 1)	127,5	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-9}$	23%	0,065
Langzeitdichtung (Salz)	50	7 x 6,53	gemäß PPB	10%**	0,29
Widerlager 2	35	8 x 7,65	$2 \cdot 10^{-15}$	10%	0,85
2. Dichtelement (Salzbeton)	70	8 x 7,65	$2 \cdot 10^{-15}$	10%	0,85
Widerlager 3	25	8 x 7,65	$2 \cdot 10^{-15}$	10%	0,85
Speicher (Schotter 2)	66	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-9}$	38%	0,065
3. Dichtelement (Sorelbeton)	30	8 x 8,36	$1 \cdot 10^{-15}$	16%	0,8
Widerlager 4	57	8 x 8,36	$1 \cdot 10^{-15}$	16%	0,8
Infrastruktur (horizontal)	1000	57 x 10*	$1 \cdot 10^{-14}$	40%	0

* Höhe wegen Anbindung an das Widerlager 4 gleich groß

** Anfangswert

Dichtelement Sorelbeton: Eine integrale Permeabilität von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ wurde trotz ungünstiger Lokationsbedingungen und unter Nutzung eines Sorelbetons geringer Steifigkeit an einem ersten Versuchsbauwerk (PSB A2 = Pilotströmungsbarriere aus Sorelbeton 29.6 A2) in der Asse erreicht /MEY 08b/, /KAM 12/, /WEI 06/. Für das Widerlager aus Sorelbeton wurde der gleiche Wert wie für das Dichtelement zu Grunde gelegt.

10.3.2 Ergebnisse

In den folgenden Abb. 10.6 und Abb. 10.7 sind die Lösungsvolumina in ausgewählten Schachtbereichen als Ergebnisse von Modellrechnungen dargestellt; in Abb. 10.6 für die oberen Schachtsegmente, in Abb. 10.7 für die unteren Segmente. In Abb. 10.8 und Abb. 10.9 sind die zeitlichen Druckverläufe für den gleichen Rechenfall dargestellt. Es wurde angenommen, dass für die Durchströmung der Komponenten die Permeabilitäten und die Porositäten nach Tab. 10.4 gelten.

Zufluss

Zu Beginn der Rechnung sind alle Segmente entsprechend der Anfangssättigung mit Lösung gefüllt, siehe auch Tab. 10.4; die Anfangssättigung wird im Modell durch ein entsprechend verkleinertes Porenvolumen abgebildet, um einen (numerisch bedingten) Abfluss dieser Anfangslösung in darunterliegende Segmente zu verhindern. Diese Modellierung ergibt daher in den folgenden Abbildungen ein kleineres Anfangsporenvolumen als zu erwarten und ein Anfangs-Lösungsvolumen von Null m^3 .

Der Zufluss aus dem Deckgebirge in den Schachtverschluss beginnt im Modell mit dem Zutritt in den Porenraum des 1. Dichtelements aus Bentonit. In Tab. 10.5 sind die Zeitpunkte der Vollsättigung aller Komponenten angegeben. Der Porenraum im Bentonit ist nach 5,5 Jahren mit Lösung gesättigt. Die zutretende Lösung fließt dann weiter in die darunterliegenden Komponenten des Schachtverschlusses. Nach 20 Jahren sind die Porenräume der Langzeitdichtung und des Widerlagers 2, nach 35 Jahren die Porenräume des Sorelbetons sowie nach 50 Jahren die Porenräume des Schotters und des Widerlagers 1 mit Lösung gesättigt. Kurz hintereinander nach 55 und 65 Jahren sind die Porenräume im Salzbeton und im Filter 1 mit Lösung gesättigt. Nach ca. 80 Jahren sind die Porenräume in der Schottersäule 2 und im Widerlager 3 mit Lösung gesättigt. Der Infrastrukturbereich ist nach 2.700 Jahren Modellzeit mit Lösung vollständig gefüllt.

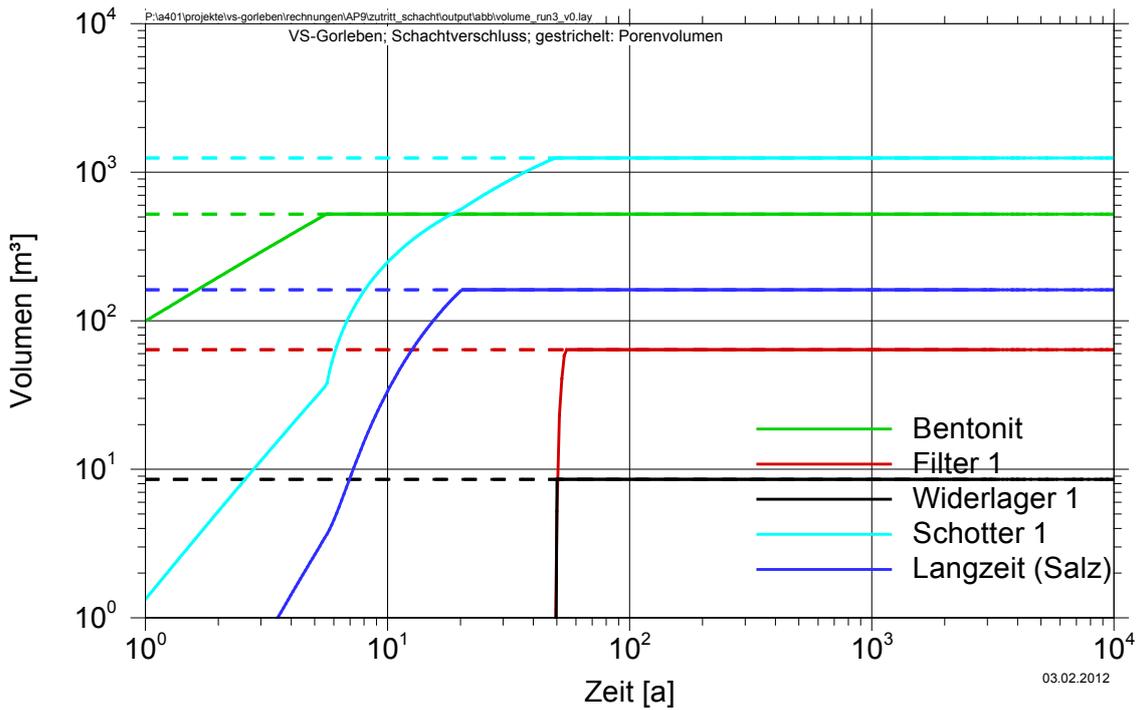


Abb. 10.6 Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; Schachtverschlussversagen

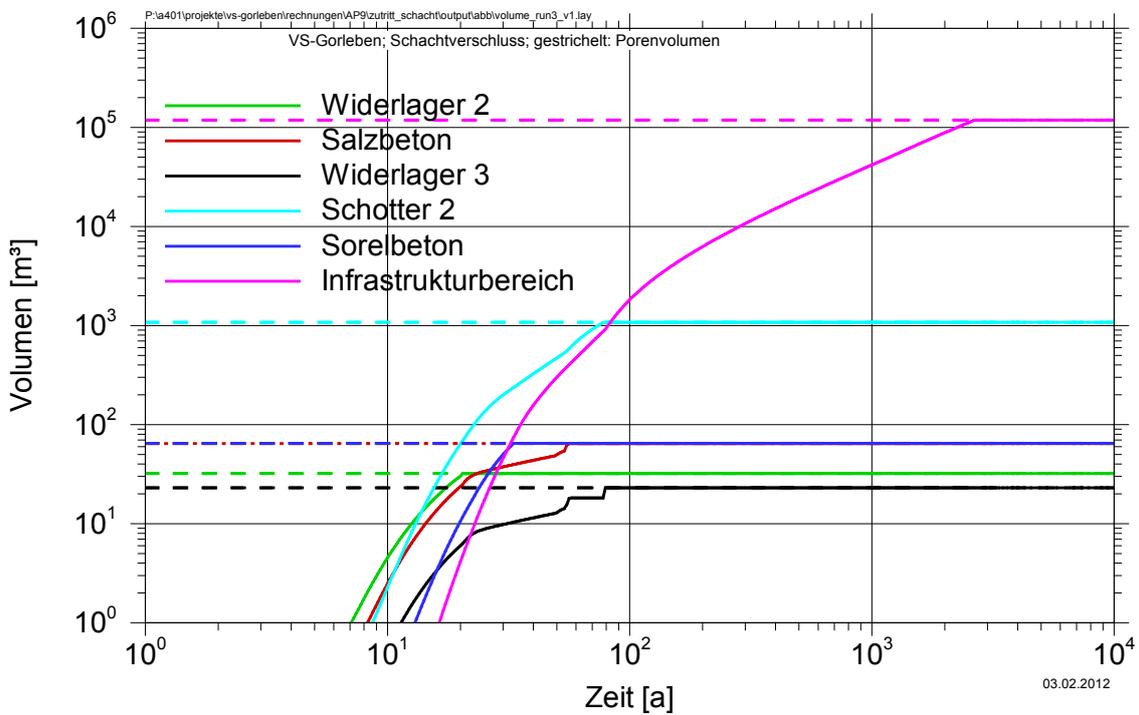


Abb. 10.7 Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; Schachtverschlussversagen

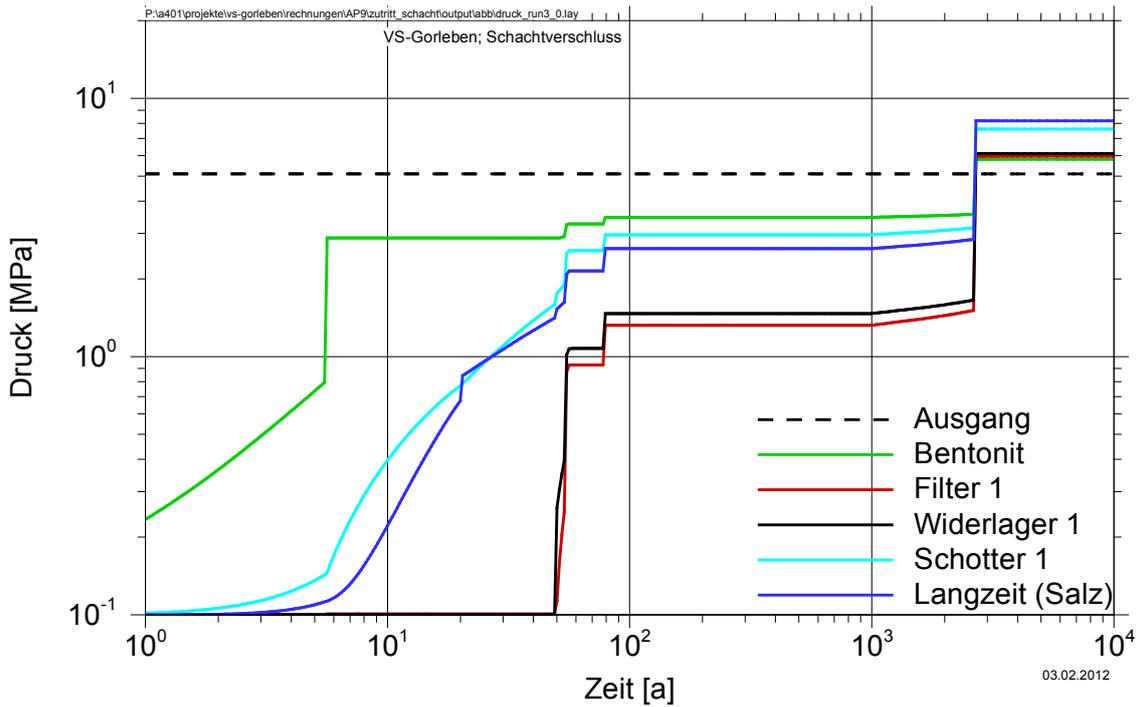


Abb. 10.8 Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; Schachtverschlussversagen

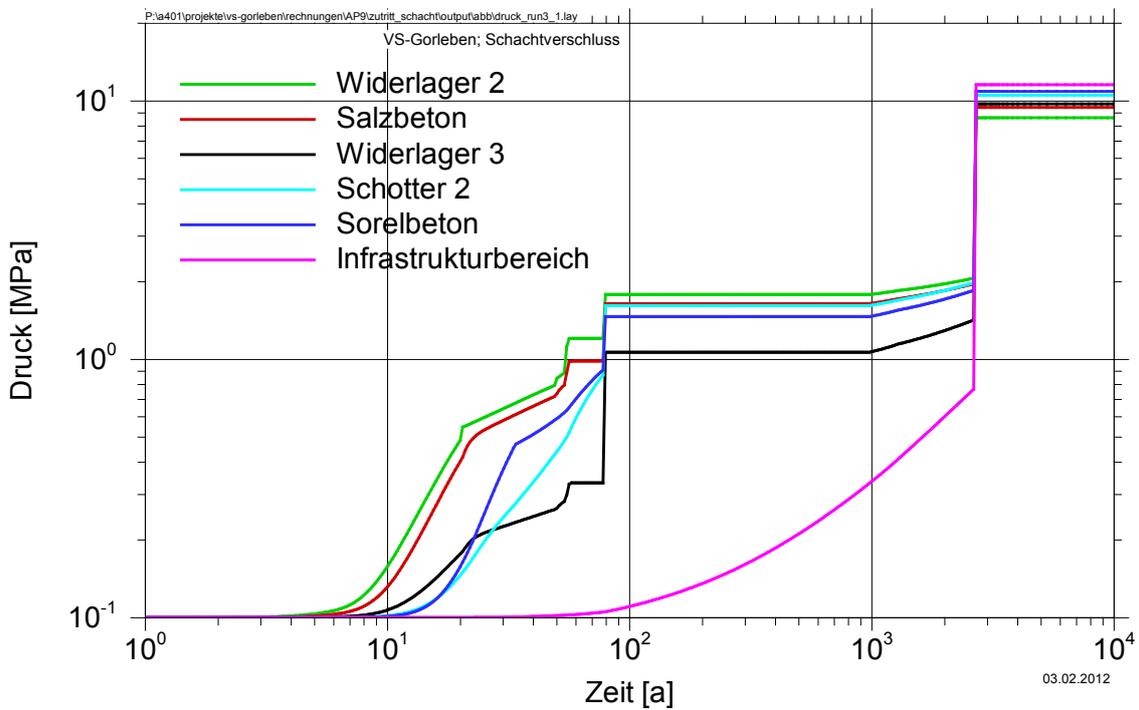


Abb. 10.9 Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; Schachtverschlussversagen

Tab. 10.5 Zeitpunkt des Volllaufens der Komponenten des Schachtverschlusses bei Schachtverschlussversagen

Komponente	Zeitpunkt [a]
Ausgang (über 1. Dichtelement)	0
1. Dichtelement (Bentonit)	5,6
Filter	55
Widerlager 1 (unter Bentonit)	50
Speicher (Schottersäule 1)	50
Langzeitdichtung (Salzgrus)	20
Widerlager 2 (unter Salzgrus)	20
2. Dichtelement (Salzbeton)	55
Widerlager 3 (unter 2. Dichtelement)	80
Speicher (Schottersäule 2)	80
3. Dichtelement (Sorelbeton)	33
Widerlager 4 (unter 3. Dichtelement)	1.300
Infrastrukturbereich	2.700

Druckentwicklung

Der Druck an der Oberkante des obersten Dichtelements (Bentonit) ist konstant und beträgt entsprechend 436 m Wassersäule 5,1 MPa, siehe Tab. 10.6. Nach dem Auffüllen des Porenraums im Filter und im Widerlager 3 steigt der Druck im Bentonit nach 80 Jahren auf 3,5 MPa. Dort und in allen anderen Komponenten oberhalb der Langzeitdichtung werden die Maximalwerte im Betrachtungszeitraum nach ca. 2.700 Jahren erreicht, sobald der Infrastrukturbereich und der gesamte Schachtverschluss mit Lösung gesättigt sind²⁵. Im Fall des intakten Schachtverschlusses werden die Maximaldrücke früher (nach 1.740 Jahren) erreicht (siehe Kapitel 10.2.2), weil dort die höheren Strömungswiderstände in den unteren Segmenten des Schachtverschlusses eine Druckerhöhung in den darüberliegenden Dichtelementen verursachen.

²⁵ In Kapitel 10.4 wird ein Zeitraum von 1.180 Jahren für das Volllaufen des Infrastrukturbereichs und das Erreichen des Maximaldrucks errechnet, obwohl in beiden Rechnungen das gleiche Systemverhalten zugrunde gelegt werden sollte. Der Unterschied wird durch die unterschiedlich detaillierte Modellierung des Schachtverschlussystems verursacht und ist für den Zweck der Rechnungen von geringer Relevanz.

In der Langzeitdichtung erreicht der Druck nach 55 und 80 Jahren jeweils ein lokales Maximum von 2,1 bzw. 2,6 MPa, das durch das Erreichen der Sättigung im Salzbeton bzw. im Widerlager 3 verursacht wird. Ähnliche Drucksprünge nach 55 und 80 Jahren ergeben sich für den Filter, das Widerlager 1, die Schottersäule 1, das Widerlager 2, das 2. Dichtelement aus Salzbeton und das Widerlager 3. Für die Schottersäule 2, das 3. Dichtelement aus Sorelbeton und das 4. Widerlager ist nur der Drucksprung nach 80 Jahren erkennbar (Zeitpunkt der vollständigen Auffüllung des darüber liegenden Widerlagers 3), da diese Segmente bereits mit Lösung gesättigt sind und sich eine vollständig gefüllte vertikale Lösungssäule oberhalb des 3. Dichtelementes ausbildet. Im Widerlager 4 und im horizontal angeschlossenen Infrastrukturbereich steigt der Druck entsprechend dem Lösungsspiegel weiter an und erreicht nach vollständiger Sättigung einen Wert von 11,5 MPa.

Tab. 10.6 Maximaldrücke und Zeitpunkte ihres Auftretens in den Komponenten des Modellverschlusses

Funktionselement	Maximaldruck [MPa]	Zeitpunkt [a]
Ausgang (über 1. Dichtelement)	5,1	(zeitlich konstant)
1. Dichtelement (Bentonit)	2,9 / 3,5 / 5,8	5,6 / 80 / 2.700
Filter	0,9 / 1,3 / 6,0	55 / 80 / 2.700
Widerlager 1 (unter Bentonit)	1,1 / 1,5 / 6,1	55 / 80 / 2.700
Speicher (Schottersäule 1)	2,6 / 3,0 / 7,6	55 / 80 / 2.700
Langzeitdichtung (Salzgrus)	2,1 / 2,6 / 8,2	55 / 80 / 2.700
Widerlager 2 (unter Salzgrus)	1,2 / 1,8 / 8,6	55 / 80 / 2.700
2. Dichtelement (Salzbeton)	1,0 / 1,6 / 9,5	55 / 80 / 2.700
Widerlager 3 (unter 2. Dichtelement)	0,3 / 1,1 / 9,8	55 / 80 / 2.700
Speicher (Schottersäule 2)	1,6 / 10,5	80 / 2.700
3. Dichtelement (Sorelbeton)	1,5 / 10,9	80 / 2.700
Widerlager 4 (unter 3. Dichtelement)	0,4 / 11,5	80 / 2.700
Infrastrukturbereich	11,5	2.700

10.3.3 Schlussfolgerungen zum Systemverhalten bei Schachtverschlussversagen

Die oberhalb des Schachtverschlusses anstehenden Lösungen dringen im Laufe der Zeit in den Schachtverschluss entsprechend den Strömungswiderständen in den Komponenten ein. Diese Lösungen fließen weiter in den Infrastrukturbereich. Die Zeitdauer bis zum Auffüllen der Porenvolumina (von unten nach oben) zwischen dem ersten (Bentonit) und dem zweiten Dichtelement (Salzbeton), d. h. im Filter und in der Schotter säule, beträgt ca. 55 Jahre. Die Zeitdauer bis zum Auffüllen der Porenvolumina (von unten nach oben) zwischen dem zweiten und dem dritten Dichtelement (Salzbeton) beträgt weitere 30 Jahre. Die Zeit bis zum Volllaufen des Infrastrukturbereichs beträgt insgesamt ca. 2.700 Jahre.

Die Druckdifferenz über das erste Dichtelement (Bentonit) ist zunächst so gerichtet, dass der höhere Druck oberhalb herrscht. In der Zutrittsphase beträgt die Druckdifferenz maximal 5,0 MPa, entsprechend dem Druck oberhalb des Dichtelements und Atmosphärendruck unterhalb. Danach reduziert sich die Druckdifferenz auf minimal Null MPa; ab 2.700 Jahren herrscht unterhalb ein höherer Druck von ca. 0,25 MPa. Nach 2.700 Jahren bauen sich die maximalen Drücke im gesamten System auf, nachdem der Infrastrukturbereich aufgefüllt ist.

Am 2. Dichtelement (Salzbeton) beträgt die Druckdifferenz zwischen 0,7 und 1,2 MPa über die gesamte Modellzeit, wobei der höhere Druck zu Beginn oberhalb des Dichtelements und ab 2.700 Jahren unterhalb des Dichtelements herrscht.

Am dritten Dichtelement (Sorelbeton) beträgt die Druckdifferenz zwischen 1 und 1,2 MPa über die gesamte Modellzeit, wobei der höhere Druck zu Beginn oberhalb des Dichtelements und ab 2.700 Jahren unterhalb des Dichtelements herrscht.

10.4 Streckenverschlüsse bei Schachtverschlussversagen (ständige Bemessungssituation)

10.4.1 Grundlagen

Das Konzept für die Streckenverschlüsse wurde im Rahmen der VSG entworfen /BOL 11/. In Abb. 2.1 ist für das Grubengebäudekonzept AB1 (Streckenlagerung) dar-

gestellt, an welchen Stellen im Grubengebäude die Streckenverschlüsse auf der 870 m-Sohle vorgesehen sind. Jeder Streckenverschluss besteht aus zwei Dichtelementen aus Sorelbeton und drei Widerlagern. Im Modell ist jeder Verschluss durch ein Segment von 100 m Länge mit einer konstanten Permeabilität abgebildet. Diese Segmente repräsentieren die Dichtelemente. In Tab. 10.7 sind die Kenndaten der verwendeten Komponenten zusammengestellt.

Tab. 10.7 Kenndaten ausgewählter Segmente des Grubengebäudes /MÜL 12a/

Funktionselement	Material	Permeabilität (Lösung) [m²]	Porosität
Infrastrukturbereich	Schotter	$10^{-7} - 10^{-9}$	38%
Streckenverschlüsse QMV, RS-VO, RS-VW, RN-VW	Sorelbeton	integral: $5 \cdot 10^{-17}$ ALZ, neu (10 cm tief)	16-24% (Anfangsporosität, durch Quellen Reduktion)
Mit Salzgrus verfüllte Bereiche (Zugangsstrecken und Richtstrecken)	angefeuchter Salzgrus	$10^{-11} - 10^{-12}$ (Anfangspermeabilität)	30% (Anfangsporosität)

In Abb. 10.10 ist die für LOPOS erstellte Segmentstruktur des Grubengebäudes für die Streckenlagerung schematisch wiedergegeben /BUH 12c/, die Zahlenwerte enthält Tab. 10.8. Weitere Modelldaten sind in /BUH 12c/ aufgeführt. Die Streckenverschlüsse QMV, RS-VO, RS-VW und RN-VW werden als Bauwerke mit jeweils 100 m Länge, 24 m² Querschnitt²⁶ und einer integralen Permeabilität von $5 \cdot 10^{-17}$ m² abgebildet; d. h. die Widerlager und Auflockerungszonen werden nicht explizit abgebildet. Dargestellt ist hier nur der für diese Rechnungen interessierende Ausschnitt des Grubengebäudes; die Richtstrecken und Einlagerungsfelder im Ostteil setzen sich noch fort.

Die Verschlusslänge im Schacht wurde zu insgesamt 100 m angenommen, d. h. überschlägig nur die Summe der Längen der Dichtelemente abgebildet, und das Porenvolumen im Infrastrukturbereich auf einen Wert gesetzt, der die Summe der Volumina auf der 840 m-Sohle und der 870 m-Sohle entspricht /BUH 12c/.

²⁶ Der Nachschnitt, der in den Strecken vor Einbau der Abdichtungen und Widerlager erforderlich ist, wurde bei diesen orientierenden Berechnungen nicht berücksichtigt.

Die Konvergenz der als kompaktierend angenommenen Segmente wird in LOPOS über einen Konvergenzansatz berechnet, der neben einer Temperaturabhängigkeit den Einfluss von Fluidruck, Stützwirkung des Versatzes, usw. berücksichtigt. Die Parameter für diesen Ansatz wurden aus früheren Rechnungen zum Standort Gorleben übernommen.

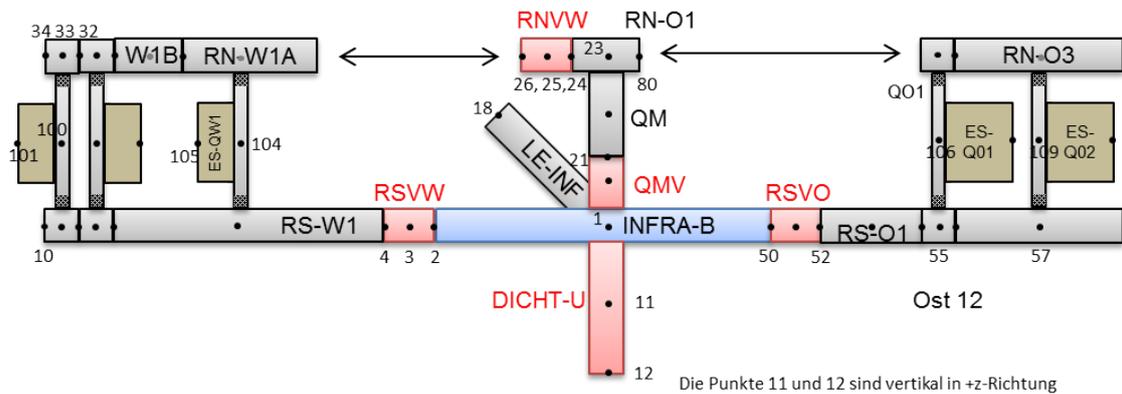


Abb. 10.10 Schematische Segmentstruktur für das Grubengebäude der Streckenlagerung (LOPOS-Modell)

QM:	Querschlag hinter dem mittleren Streckenverschluss
QMV:	mittlerer Streckenverschluss
RS:	Richtstrecke Süd (RS-Ox – östlich; RS-Wx – westlich)
RN:	Richtstrecke Nord (RN-Ox – östlich; RN-Wx – westlich)
RS-VW, RS-VO:	Streckenverschluss in der südlichen Richtstrecke (westlich, östlich)
RN-VW:	Streckenverschluss in der nördlichen Richtstrecke
INFRA-B:	Infrastrukturbereich
LE-INF:	Lösungseinschluss im Infrastrukturbereich (5000 m ³)
DICHT-U:	Schachtverschluss

Tab. 10.8 Modelldaten (LOPOS) ausgewählter Segmente des Grubengebäudes

Segment	Länge [m]	Querschnitt* [m ²]	Permeabilität [m ²]	Porosität
Ausgangssegment (Filter/Aufsättigung)	100	7 x 6,53	$1 \cdot 10^{-15}$	5%
Infrastrukturbereich	1.000	3,6 x 85,8	** $1 \cdot 10^{-14}$	38%
Streckenverschlüsse QMV, RS-VO, RS-VW, RN-VW	100	3,6 x 6,67	$5 \cdot 10^{-17}$	20%
Mit Salzgrus verfüllte Bereiche (Zugangs- und Richtstrecken)	(unterschiedlich)	3,6 x 6,39	*** gemäß PPB	30%

* Die Modellsegmente werden aus programmtechnischen Gründen als rechteckig modelliert; der Querschnitt ist der gleiche wie im vorgegebenen Grubengebäudemodell

** Aus numerischen Gründen abweichend von den Kenndaten

*** PPB: Permeabilitäts-Porositätsbeziehung gemäß /WIE 12/. $k(\phi) = 6,7 \cdot 10^{-5} \phi^{9,32}$. Aus programmtechnischen Gründen wurde für den gesamten Bereich der Porositäten einheitlich die gleiche Permeabilitäts-Porositätsbeziehung angesetzt, die gemäß /WIE 12/ für den Wertebereich 5% bis 10% gilt

Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Segmente, die den Schacht repräsentieren, zum Beginn der Rechnung instantan mit Lösung gefüllt sind. Der Zufluss in den Infrastrukturbereich erfolgt entsprechend den Strömungswiderständen des Schachtverschlusses (angesetzte Länge: 100 m, Querschnitt: 46 m²). Als Anfangsdruck im luftgefüllten Grubengebäude wird 0,1 MPa angenommen.

Mit dem Programm LOPOS kann nur eine einphasige Strömung im Grubengebäude berechnet werden. Die Auswirkungen einer Gasphase bleiben unberücksichtigt. Für die Zutrittsphase, in der nur geringe Fluiddrücke im Grubengebäude auftreten, ist diese Einschränkung ohne relevante Auswirkungen auf die Rechenergebnisse. Für die Phase nach dem Volllaufen einzelner Bereiche müssten die Einflüsse der Gasphase berücksichtigt werden. Da aber auch die Ergebnisse von Rechenprogrammen, die einen Zweiphasenfluss berücksichtigen können, mit großen Ungewissheiten versehen sind (z. B. wegen der sehr ungewissen Parameter für den Zweiphasenfluss), erscheint es angemessen, hier auf reine Einphasenrechnungen zurückzugreifen.

10.4.2 Ergebnisse

Wie im vorhergehenden Kapitel 10.4.1 bereits erwähnt, wurde der Schachtverschluss in den hier diskutierten Rechnungen anders abgebildet als in den Rechnungen zum Zufluss über den intakten oder den nicht intakten Schacht, siehe Kapitel 10.2 und 10.3.

Der Grund liegt in den numerischen Anforderungen an die Modellierung des horizontal detailliert abgebildeten Grubengebäudes, die sich nicht problemlos mit der detaillierten Modellierung des Schachtverschlusses kombinieren ließ. Daher wurden für die beiden Schachtverschlüsse Kenndaten geschätzt, die stark vereinfachte Geometrien abbilden und ungefähr zu den gleichen Zuflussraten in den Infrastrukturbereich führen. Die im Folgenden angeführten abweichenden Ergebnisse beruhen auf diesen vereinfachten Annahmen und sind für den Zweck der Bemessung der Streckenverschlüsse ausreichend.

Die Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS haben orientierenden Charakter; die Ergebnisse dienen der Bemessung der Streckenverschlüsse und zielen darauf ab, den Lösungsdruckaufbau an den Streckenverschlüssen konservativ abzuschätzen. Weiterhin dienen sie einer schnellen, ersten Prüfung, ob das Verschlussystem prinzipiell in der Lage ist, auch im Falle Schachtverschlussversagen einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu unterbinden oder ob eine weitere Modifikation des Entwurfs des Verschlussystems vorgenommen werden sollte. Sie sind nicht mit den Ergebnissen von Modellrechnungen zum Langzeitsicherheitsnachweis mit den Programmen MARNIE und TOUGH zu vergleichen, siehe /LAR 13/. Relevant sind hier die berechneten Volumina und Drücke in den Segmenten der Verschlüsse sowie in den angrenzenden Modellsegmenten. Alle anderen Angaben sind nur zum Verständnis dieser Werte aufgeführt und um ihre Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

In der folgenden Abb. 10.11 sind die Volumina in ausgewählten Segmenten des Grubengebäudes als Ergebnisse der Modellrechnungen dargestellt. Der Zufluss aus dem Schacht bis zur Auffüllung des Infrastrukturbereichs dauert rechnerisch ca. 1.180 Jahre. Von dort gelangt die Lösung in die Streckenverschlüsse und füllt diese nach ca. 1.300 Jahren auf. Die an die Verschlüsse anschließenden, mit unterschiedlicher Geschwindigkeit kompaktierenden Strecken werden mit Ausnahme des Querschlags QM und der Richtstrecken RS-O1, RS-O2 und RS-W1 in der Modellzeit von 100.000 Jahren nicht mit Lösung gesättigt, da gemäß dem LOPOS-Modell die Lösungen auch bei sehr geringen Porositäten advektiv weitertransportiert werden können. Die Richtstrecken RS-O1 und RS-O2 werden jedoch zuerst vollständig gefüllt. Weil sich dort die Porenräume durch die Temperaturerhöhung wegen der Nähe zu den Einlagerungsstrecken und der daraus resultierenden schnellen Konvergenz rasch verkleinern, sind sie bei gleichen Lösungsvolumina wie in den Modellstrecken QM und RS-W1 zuerst gefüllt. Die Richtstrecken QM und RS-W1 werden nach ca. 20.000 bzw. 56.000 Jahren

gefüllt, da der Versatz dort ohne Temperaturerhöhung langsamer kompaktiert und im Modell das Porenvolumen größer ist als in den Segmenten des Ostflügels (dies liegt an der Ortsdiskretisierung der Richtstrecken für die LOPOS-Rechnungen).

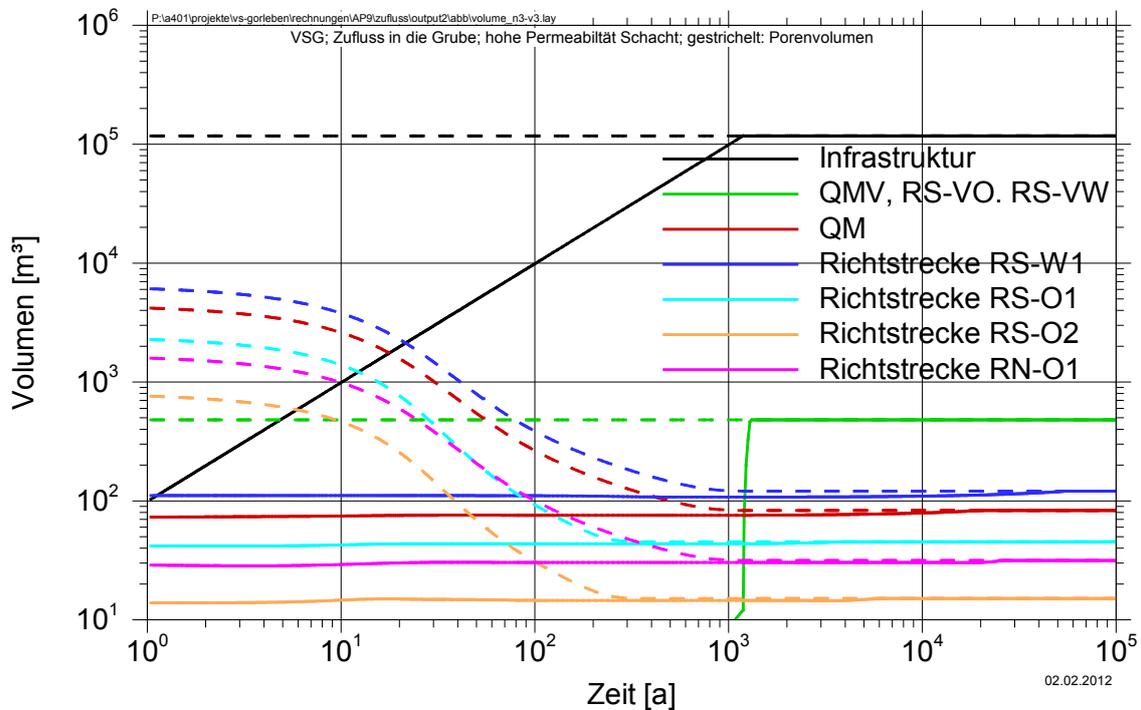


Abb. 10.11 Lösungs- und Porenvolumina im Infrastrukturbereich und in angrenzenden Segmenten; die Porenvolumina sind gestrichelt dargestellt

Tab. 10.9 Zeitpunkte des errechneten Volllaufes von Segmenten des Grubengebäudes

Segment	Zeitpunkt des Volllaufes [a]
Infrastrukturbereich	1.180
Streckenverschlüsse: QMV, RS-VO, RS-VW	1.300
Querschlag QM	20.000
Richtstrecke RN-O1	27.000
Richtstrecke RS-O1	4.000
Richtstrecke RS-O2	6.200
Richtstrecke RS-W1	56.000

In der Abb. 10.12 sind die zeitlichen Druckverläufe in ausgewählten Segmenten des Grubengebäudes für den gleichen Rechenfall dargestellt. Im Infrastrukturbereich steigt der Druck zum Zeitpunkt des Volllaufes auf 9,0 MPa an; nach Volllaufen der angren-

zenden Streckenverschlüsse erreicht er seinen Maximalwert von 10,3 MPa. Die Streckenverschlüsse sind nach 1.300 Jahren aufgefüllt, siehe Tab. 10.9. Zu diesem Zeitpunkt steigt der Druck in diesen Verschlüssen ebenfalls auf 10,3 MPa an. Nach 4.000 Jahren ist die Richtstrecke RS-O1 mit Lösung gesättigt und der Druck steigt dort auf 5,9 MPa an. Sobald auch der angrenzende Teil der Richtstrecke (RS-O2) aufgefüllt ist, steigt im Modell der Druck in RS-O1 auf 6,7 MPa und in RS-O2 auf 1,8 MPa an. Bei diesen Werten ist zu beachten, dass die gesamte Richtstrecke in acht Teilsegmente aufgeteilt wurde und dass sich bei feinerer Diskretisierung ein stetiger Druckverlauf über die gesamte Länge der Richtstrecke ergeben würde. Direkt am Streckenverschluss ist von einem Druck in der Größenordnung von 6,7 MPa auszugehen.

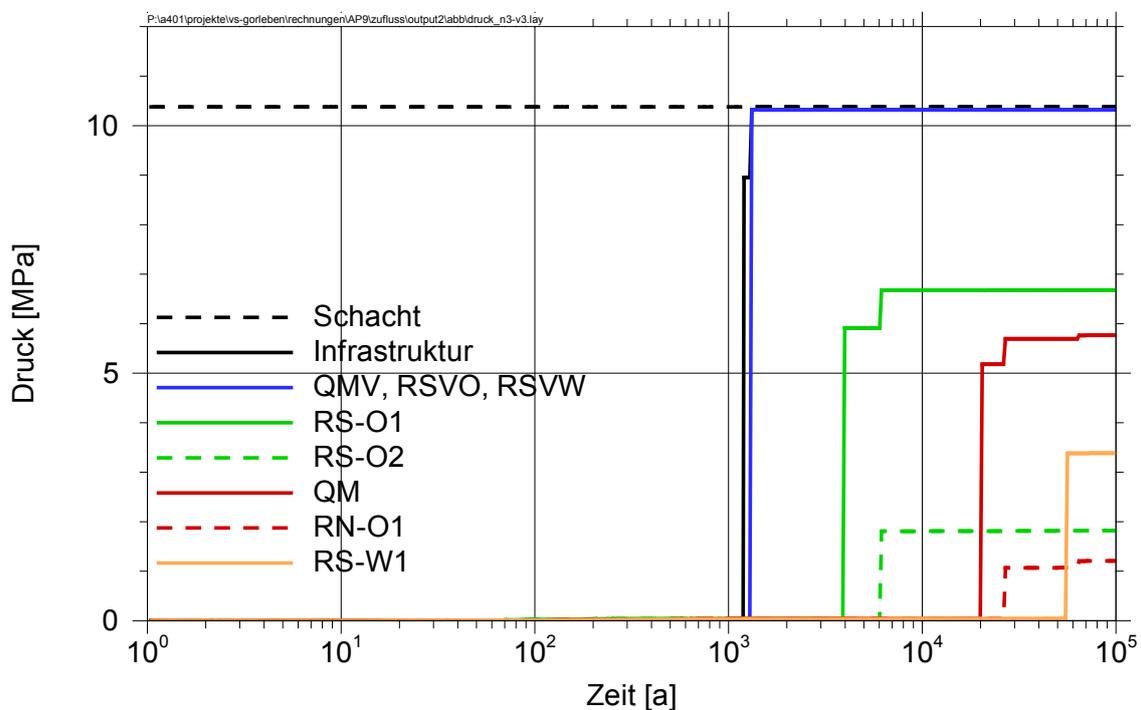


Abb. 10.12 Druckverläufe im Infrastrukturbereich und in angrenzenden Segmenten

Tab. 10.10 Maximaldrücke und Zeitpunkte ihres Auftretens in ausgewählten Segmenten des Grubengebäudes

Segment	Maximaldruck [MPa]	Zeitpunkt [a]
Schacht	10,4	(konstant)
Infrastrukturbereich	(9,0) 10,3	(1.180) 1.300
Streckenverschlüsse QMV, RS-VO, RS-VW, RN-VW	10,3	1.300
Querschlag QM	(5,2) 5,7	(20.000) 27.000
Richtstrecke RN-O1	1,1	27.000
Richtstrecke RS-O1	(5,9) 6,7	(4.000) 6.200
Richtstrecke RS-O2	1,8	6.200
Richtstrecke RS-W1	3,4	56.000
Richtstrecken, sonst	< 0,2	-

Der Querschlag QM (der wie eine Richtstrecke mit Lösung angefeuchteten Versatz enthält) ist nach ca. 20.000 Jahren aufgefüllt; zu diesem Zeitpunkt steigt der Druck auf 5,2 MPa. Mit dem Volllaufen der angrenzenden Richtstrecke RN-O1 steigt dieser Druck auf 5,7 MPa, in der Richtstrecke RN-O1 selbst auf 1,1 MPa. Die Richtstrecke RS-W1 ist nach ca. 56.000 Jahren aufgefüllt; zu diesem Zeitpunkt steigt der Druck auf 3,4 MPa. Alle anderen Richtstrecken und Teilbereiche von Richtstrecken werden von der eindringenden Lösung zwar erreicht, aber wegen geringerer Konvergenz nicht in der Modellzeit aufgefüllt. Daher steigen die Drücke in diesen Segmenten auch nicht über ca. 0,2 MPa an (numerischer Wert, entsprechend der Spiegelhöhe in den jeweiligen Segmenten).

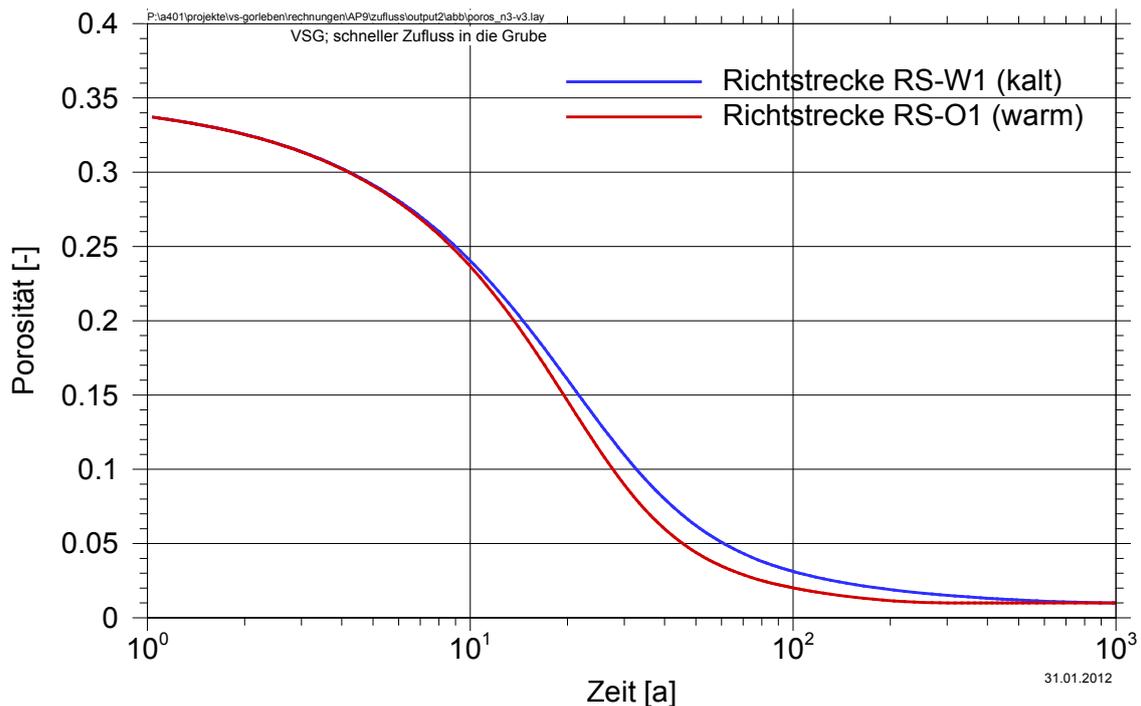


Abb. 10.13 Porositätsentwicklung in ausgewählten Richtstrecken

10.4.3 Schlussfolgerungen zum Systemverhalten bezüglich der Auslegung der Streckenverschlüsse

Unter der Annahme eines anfangs lösungsgefüllten Schachtverschlusses und einer integralen Durchlässigkeit des Schachtverschlusses, die höher als die Auslegungswerte ist, läuft der Infrastrukturbereich in 1.180 Jahren kontinuierlich voll. Dadurch bauen sich an den Streckenverschlüssen Drücke auf, die nach Volllaufen des Infrastrukturbereichs einen Wert von 9,0 MPa erreichen, siehe Abb. 10.12. Nach Sättigung der Streckenverschlüsse nach 1.300 Jahren steigen die Drücke dort und im Infrastrukturbereich auf Werte von ca. 10,3 MPa an; in den angrenzenden Richtstrecken und Querschlägen sind die Drücke zu dieser Zeit noch unterhalb 0,2 MPa.

Gemäß Abb. 10.13 ist rechnerisch in diesen Richtstrecken nach 1.000 Jahren bereits eine Porosität von 1 % erreicht. Durch das Volllaufen des Querschlags QM sowie der Richtstrecken RS-O1, RS-O2 und RS-W1 wird im Modell der hydraulische Druckgradient über die Verschlüsse QMV, RS-VO und RS-VW jeweils ab dem Zeitpunkt des Volllaufens verkleinert, siehe die in Tab. 10.10 angegebenen maximalen Druckwerte. Die Richtstrecken RS-O1 und RS-O2 laufen wegen der aufgrund erhöhter Temperaturen

schnelleren Konvergenz²⁷ am schnellsten voll, so dass hier der hydraulische Differenzdruck über den Streckenverschluss frühzeitig sinkt.

In Abb. 10.13 sind die Porositätsverläufe für ausgewählte Richtstrecken dargestellt, wie sie sich in den derzeitigen Rechnungen aufgrund der Modellierung der Konvergenz ergeben. Für die „warme“ Strecke mit angefeuchtetem Salzgrus ergeben sich nach ca. 100 bis 200 Jahren Porositäten im Bereich von 1 %, bei der „kalten“ Strecke erst nach einem Zeitbereich von ca. 500 bis 800 Jahren. Dies ist in ausreichender Übereinstimmung mit den Ergebnissen in Kapitel 5.

10.5 Bewertung

Die Ergebnisse der Modellrechnungen deuten darauf hin, dass sich sowohl bei intakten Schachtverschlüssen als auch bei Schachtverschlussversagen und intakten Streckenverschlüssen kein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den eingelagerten Abfällen ausbilden wird. Eine detaillierte Untersuchung hierzu ist Bestandteil anderer Rechnungen /LAR 13/.

Aus den orientierenden Modellrechnungen zur Auslegung der Schachtverschlüsse ergibt sich, dass sich im Fall des Schachtverschlussversagens die detaillierte Aufteilung des Schachtes auswirkt. Die Verzögerungswirkung der Speichervolumina in den einzelnen Komponenten des Schachtverschlusses führt dazu, dass in diesem Fall der Infrastrukturbereich erst nach 2.700 Jahren aufgefüllt ist und der hydraulische Druck sich entsprechend spät aufbaut, während dies bei vereinfachtem Ansatz für den Schacht bereits nach 1.180 Jahren erfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei dem vereinfachten Ansatz sowohl eine instantane Auffüllung aller Schachtsegmente mit Lösung als auch ein größerer Querschnitt (geringerer Strömungswiderstand) angenommen wurde. Da in Bezug auf den Durchfluss Druck und Querschnitt als Produkt eingehen (Kapitel 7.3.2), lässt sich einschätzen, dass sich das Ergebnis nur gering ändert.

²⁷ In den Richtstrecken RS-O1 und RS-O2 ist die Temperaturerhöhung durch die Wärmeproduktion der Abfälle berücksichtigt. Die Erhöhung der Temperatur erreicht ein Maximum von ca. 27 Kelvin nach 500 Jahren; der Temperaturverlauf entstammt einer alten Rechnung (Projekt ISIBEL). Der Temperaturverlauf entspricht in etwa der Temperaturstützstelle TS1 gemäß der Planung für die Marnie-Rechnungen. Die höhere Temperatur führt zu der schnelleren Konvergenz.

Die Modellrechnungen zur Vorbemessung der Schacht- und Streckenverschlüsse liefern Druckverläufe an den einzelnen Komponenten des Verschlussystems bei unterschiedlichen Systemzuständen. Diese dienen im Rahmen der vertieften Nachweisführung /MÜL 12c/ als Eingangsgrößen.

11 Plausibilitätsbetrachtung zur thermischen Auslegung

Während durch die Vorbemessung in Kapitel 7 und 10 ausgewählte chemische, mechanische und hydraulische Einwirkungen erfasst wurden sowie thermische Einwirkungen, die aus Bauzuständen resultieren, über die vorhandenen Prototypen bewertbar sind, gilt dies nicht für thermische Einwirkungen in Folge der wärmeentwickelnden, radioaktiven Abfälle, da diese in Bezug auf die Bauwerksintegrität (Abb. 4.1) über gekoppelte Prozesse wirksam werden. Der Einfluss der Temperaturerhöhung auf die Korrosionsprozesse wurde als vernachlässigbar²⁸ bewertet (vgl. Kapitel 7.1.5). Der Einfluss der Temperaturerhöhung in Bezug auf das (thermo)mechanische Verhalten wird an Hand vorliegender Temperatur-Zeitverläufe an den Lokationen der Streckenverschlüsse (Abb. 11.1) im Rahmen einer Plausibilitätsbetrachtung bewertet, da an diesen Lokationen höhere Temperaturen und Temperaturdifferenzen auftreten als in den Schächten.

In /RÖH 05/ ist eine Temperaturvorgabe für den Temperaturanstieg für Wasserbauwerke aus konventionellem Beton und Stahlbeton angegeben. Der maximale Temperaturanstieg im Bauteil soll unter 35 K bleiben. Weiterhin sind Vorgaben für die Differenz der mittleren Bauteiltemperatur und Umgebung zur Vermeidung von Trennrissen vorhanden. Die Vorgaben hängen u. a. von der Betonfestigkeitsklasse ab. Sie beträgt 20 K für Beton der Festigkeitsklasse C 20/25, 15 K für Beton der Festigkeitsklasse C 35/45 und 10 K für hochfesten Beton. Für den Beton C 20/25 wird die vergleichsweise hohe zulässige Temperaturdifferenz mit der Relaxationsfähigkeit von Betonen dieser Festigkeitsklasse begründet.

Sowohl für den Salzbeton Typ Asse als auch den Sorelbeton A1 ist eine maßgebliche Relaxationsfähigkeit anzunehmen. Für den Sorelbeton A1 liegen Ergebnisse von Kriech- und Relaxationsversuchen vor /BFS 09/, /KAM 11/. Für den Salzbeton Typ Asse liegen aus der Vergangenheit die Ergebnisse von Kriechversuchen /ENG 89/ vor, die Kriech- und Relaxationsfähigkeit belegen. Insofern sollte eine Temperaturdifferenz von 20 K für das Bauwerk unschädlich sein. Sowohl die maximale Temperaturerhöhung von 35 K als auch die maximale Temperaturdifferenz von 20 K ist für den un-

²⁸ Vorsorglich soll darauf hingewiesen werden, dass sich der Bischoffit schon bei niedrigen Temperaturen zersetzt, so dass er ggf. z. T. in Lösung vorliegt. Seine Pufferwirkung wird dabei nicht beeinträchtigt.

günstigsten Streckenverschluss Ost eingehalten, vgl. Abb. 11.1. Auf Basis der dieser auf empirischen Kriterien beruhenden Plausibilitätsbetrachtung kann geschlussfolgert werden, dass Trennrissbildung in Folge thermomechanischer Zwangsspannungen vernachlässigt werden kann.

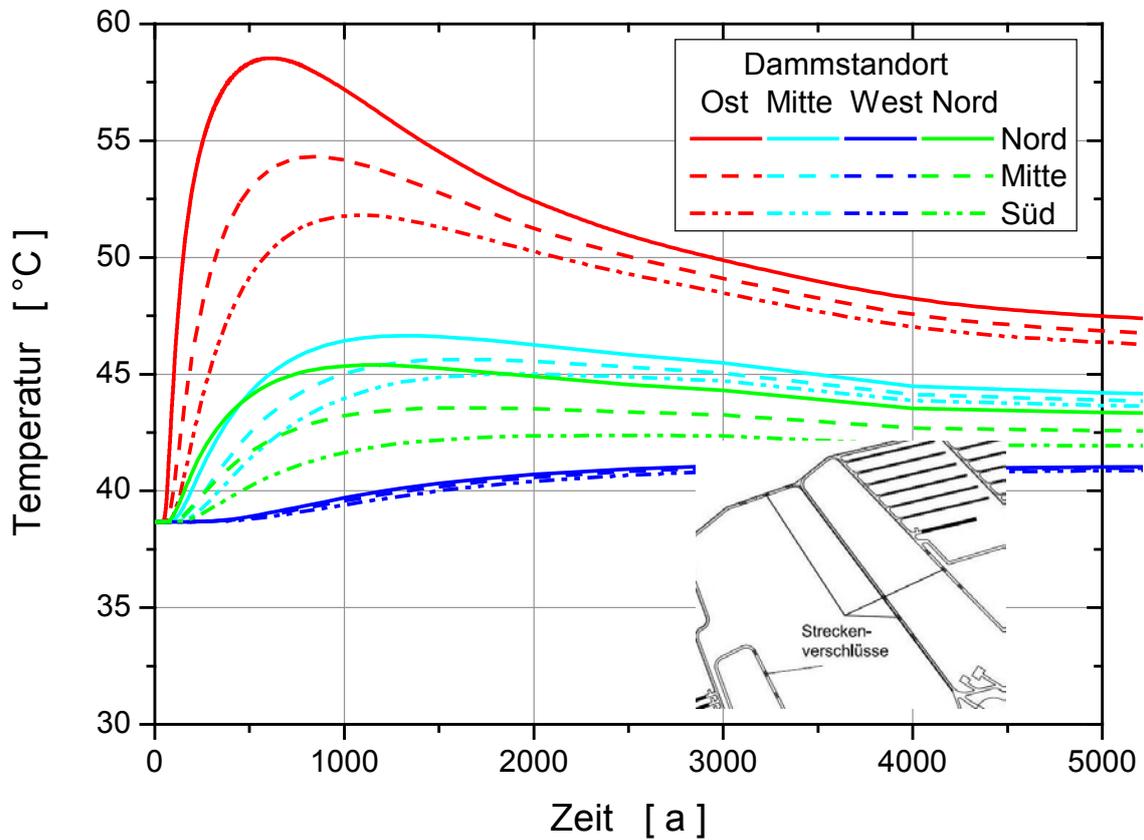


Abb. 11.1 Temperatur-Zeitverläufe an den Lokationen der Streckenverschlüsse /BOL 12/

12 Bewertung des Verschlusssystems auf Grundlage der Vorbemessung

Die nachstehenden Aussagen gelten unter der Voraussetzung, dass die in /CZA 12/, /POP 12/ abgeleiteten Annahmen zur Salzgruskompaktion und die damit verbundene Porositäts-Permeabilitätsbeziehung bzw. Druck-Permeabilitätsbeziehung (bei kleinen Porositäten) unter den standortspezifischen Bedingungen des Standortes Gorleben belastbar sind und im Ergebnis weiterführender Untersuchungen grundsätzlich bestätigt werden, so dass Infiltration vermieden wird.

Für die ständige Bemessungssituation (= Referenzszenarium) kann festgestellt werden, dass unter den konservativen Annahmen der Vorbemessung kein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen auftritt. Im Falle des Referenzszenariums führt auch der sich in den Einlagerungsbereichen entwickelnde Gasdruck nicht zu einem Zutritt von Tages- und Deckgebirgswässern zu den radioaktiven Abfällen, da der Gasdruck im Speichervolumen des Infrastrukturbereiches soweit reduziert wird, dass er den Schachtverschluss nicht gefährdet. Für diese Aussage ist baupraktisch eine ausreichende Zuverlässigkeit gegeben, da die Vorbemessung zeigt, dass die verschiedenen Komponenten, für die Prototypen vorhanden sind, nur in geringem Umfang beansprucht werden und weiterhin ein erheblicher Zeitpuffer für die Salzgruskompaktion zur Verfügung steht.

Im Falle der außergewöhnlichen Bemessungssituation Streckenverschlussversagen (= Alternativszenarium) tritt ebenfalls kein Zutritt von Tages- und Deckgebirgswässern zu den radioaktiven Abfällen auf, da der Schachtverschluss allein in der Lage ist, den Zutritt zu unterbinden. Die möglicherweise salzstockintern vorhandenen, zu betrachtenden Lösungen (Formationswässer) von maximal 5.100 m³, die in den Infrastrukturbereich zutreten /WOL 12/, zu denen ggf. noch die hinzukommen, die möglicherweise aus einer thermischen Zersetzung des Bischofites entstehen, sind in diesem Fall gesondert zu betrachten. Sie können jedoch durch die Erstellung von Grubenbauen im Infrastrukturbereich, die als Sumpf wirken, und z. T. im Infrastrukturbereich der aufgefahre- nen Erkundungssohle bereits vorhanden sind, konstruktiv beherrscht werden.

Im Fall der außergewöhnlichen Bemessungssituation Schachtverschlussversagen (= Alternativszenarium) weisen die Ergebnisse der Vorbemessung (Kapitel 10) darauf hin, dass ebenfalls kein Zutritt von Tages- und Deckgebirgswässern zu den Abfällen

erfolgt. Jedoch bestehen die bereits benannten Ungewissheiten bzgl. der Salzgruskompaktion. Weiterhin wurde der Gaspfad im Rahmen der Vorbemessung nicht untersucht. Die Ergebnisse haben deshalb nur orientierenden Charakter.

Die Herstellbarkeit des Verschlusssystems ist durch die bereits existierenden Prototypen und Bauwerke praktisch gesichert. Der Nachweis der Filterstabilität, auf den im Rahmen der Vorbemessung nicht eingegangen wurde, wird durch Anordnung von Filterschichten aus geeignet gestuften Kiesen und Sanden gewährleistet. Dieser Sachverhalt ist im Funktionsentwurf berücksichtigt.

Als Fazit lässt sich festhalten: Während für die Fälle des Referenzszenariums und der Alternativszenarien „Streckenverschlussversagen“ unter Voraussetzung der Gültigkeit der Aussagen zur Salzgruskompaktion gemäß Kapitel 5 bereits das Zuverlässigkeitsniveau einer bautechnischen Auslegung erreicht wird, haben die Aussagen zum Fall „Schachtverschlussversagen“ noch orientierenden Charakter. Eine Zuverlässigkeitsbewertung ist noch nicht möglich, jedoch können zur Verbesserung der Zuverlässigkeitsaussage prinzipiell zwei Wege beschritten werden:

- Verbesserung der Modellierungswerkzeuge, Verbesserung sowohl der Erkenntnisse zum Materialverhalten als auch der Datenbasis und als Folge davon der Abbau von Konservativitäten
- Optimierung des Endlagerkonzeptes in Bezug auf die Sachverhalte, die die Ungewissheiten hervorrufen. Dies betrifft aufgrund der Rückkopplung (Abb. 2.1) die hier noch nicht behandelten Gasdrücke auf die Streckenverschlüsse. Maßnahmen zur Reduzierung der Gasbildung sollten deshalb in Betracht gezogen werden. Weiterhin können die Grubengebäudeplanung und das Verschlusssystem auf Grundlage des nunmehr erreichten Wissensstandes optimiert werden.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass das Szenarium „Schachtverschlussversagen“ für den vorliegenden Entwurf des Schachtverschlusses sehr konservativ ist, da alle drei Dichtelemente im Schacht durch die bautechnische Auslegung voneinander entkoppelt sind. Damit ist der Fall Schachtverschlussversagen, der das Versagen aller drei Dichtelemente beinhaltet, aufgrund seiner geringen Eintrittswahrscheinlichkeit auszuschließen.

Glossar

Ausnutzungsgrad	Verhältnis eines vorhandenen Wertes zu einem zulässigen Wert.
Dauerhaftigkeit	In Anlehnung an /CEN 10/ ist ein dauerhafter Verschluss so zu bemessen, dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Verschlusses während des geplanten Funktionszeitraum nicht unvorhergesehen verändern. Dabei sind die Umweltbedingungen zu berücksichtigen.
Integrale Permeabilität	Die mit den Flächenanteilen gewichteten Permeabilitätswerte parallel geschalteter Einzelelemente bezogen auf eine Bezugsfläche. Als Bezugsfläche wird in der Regel der offene Querschnitt einschließlich Nachschnitt gewählt.
Lösender Angriff	Bei der Korrosion von mineralischen Baustoffen unterscheidet man zwischen dem lösenden und dem treibenden Angriff. Im Falle des lösenden Angriffs werden einzelne Phasen des Baustoffes in der mobilen Phase gelöst. Während eines treibenden Angriffs bilden sich im Baustoff Phasen mit gegenüber den Ausgangsphasen vergrößerten Volumen.
Umläufigkeit	Im Bergbau Beschreibung für den Sachverhalt der Umströmung eines Dichtelementes im angrenzenden Gebirgsbereich.
Widerlager, dräniertes	In das Widerlager werden in Längsrichtung angeordnete Drainageöffnungen eingebaut. Damit kann vor dem Widerlager anstehende Lösung drucklos in das Speichervolumen abfließen. Ein Hinterlösen der Widerlagers im Kontaktbereich Salzkontur/Widerlager wird so vermieden.

Literaturverzeichnis

- /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 04a/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2. Verfahrensunterlage P192, PFV zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, BfS-KZL 9M/22343021/GC/RB/0054/00, Stand 17.11.2004.
- /BFS 04b/ Bundesamt für Strahlenschutz (BFS): Konzept- und Systembeschreibung, Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie. Verfahrensunterlage G 183, PFV zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, BfS-KZL 9M/223450/GHS/TK, 2004.
- /BFS 04c/ Bundesamt für Strahlenschutz (BFS): Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen. Verfahrensunterlage P195, PFV zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, BfS-KZL 9M/22310111/GH/RB/0063/00, Stand 08.06.2004.
- /BFS 08/ Bundesamt für Strahlenschutz (BFS): Mikroskopische Untersuchung des Kontaktbereiches von Steinsalz und Salzbeton: Asse-Vordamm. BfS-KZL: 9M/22310131/GH/RB/0145/00, Stand 05.03.2008.
- /BFS 09/ Asse-GmbH, DBE TECHNOLOGY GmbH: Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten und Resthohlräume in der Südflanke der Schachtanlage Asse ausgewählten Baustoffe Sorelbeton A1 und A1-560. BfS-KZL 9A/44215100/GHR/TV/0001/00, Bundesamt für Strahlenschutz (BFS), Stand 03.03.2009.

- /BFS 10/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Untersuchung der Kontaktzone am Asse-Vordamm – Zusammenfassung und Interpretation der Messergebnisse. BFS-KZL 9M/22310131/GH/RB/0130/00, Stand 03.05.2010.
- /BGR 03/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Hannover, 2003.
- /BGR 11/ Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR): Kriechkennwerte für geplante Streckenschlüsse in Gorleben auf der 870-m-Sohle. Schreiben, B3.4/B50120-04/2010-0001/009, 14.10.2011.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /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 02/ Bornemann, O., Behlau, J., Mingerzahn, G.: Projekt Gorleben, Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie) 2. Geologische Fachbericht (Geologische Schnitte zur untertägigen Erkundung). 9G4121100000, 11813/02, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 25. Juni 2002.
- /BRE 02/ Breidung, K.P.: Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. Abschlussbericht (Kurzfassung), K+S Aktiengesellschaft: Bad Salzdetfurth, 2002.

- /BUH 12a/ Buhmann, D.: Durchströmung von Schachtverschlüssen, Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS, Veränderte Aufteilung des Schachts. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, grs-notiz 808800-04, Version 04, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 23.04.2012.
- /BUH 12b/ Buhmann, D.: Durchströmung eines Schachtes bei gestörter Entwicklung. Modellrechnungen mit dem Computercode LOPAS. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, grs-notiz 808800-06, Version 01, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 09.03.2012.
- /BUH 12c/ Buhmann, D.: Zufluss in das Grubengebäude bei Schachtversagen, Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, grs-notiz 808800-05, Version 04, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 23.04.2012.
- /CEN 09/ CEN – Europäisches Komitee für Normung: Eurocode 7: Entwurf, Bemessung und Berechnung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln. DIN EN 1997-1, Deutsche Fassung EN 1997-1:2004+AC:2009: Brüssel, Stand Dezember 2009.
- /CEN 10/ CEN – Europäisches Komitee für Normung: Eurocode, Grundlagen der Tragwerksplanung. DIN EN 1990, Deutsche Fassung EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC: Brüssel, Stand Dezember 2010.
- /CRI 98/ Cristescu, N.D., Hunsche, U.: Time Effects in Rock Mechanics. ISBN 0471955175, Wiley & Sons, 1998.
- /CZA 12/ Czaikowski, O., Wiczorek, K.: Salzgruskompaktion – Kalibrierung der in CODE_BRIGHT verwendeten physikalischen Modellansätze zur numerischen Simulation. internes Memo im Arbeitspaket 9.2 des Vorhabens "Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben", Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 15.06.2012 (Rev. 30.08.2012).

- /DAF 04/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“. Oktober 2004.
- /DBE 07/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Schacht 1, Innenausbaufundament und Stützringe, Übersicht geotechnische Messstellen. KZL: 9G/00YES01/GC/RX/0039/03, Stand 26.02.2007.
- /DBE 09a/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Bergwerk zur Erkundung des Salzstockes Gorleben, Schachtbild Schacht 1, Blätter 1 bis 10, Betriebszustand 28.02.2009 (Blatt 1-4 und 9), Betriebszustand 31.08.2009 (Blatt 5 – 8 und 10). 2009.
- /DBE 09b/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Bergwerk zur Erkundung des Salzstockes Gorleben, Schachtbild Schacht 2, Blätter 1 bis 9, Betriebszustand 28.02.2009 (Blatt 1-4 und 9), Betriebszustand 31.08.2009 (Blatt 5 – 8). 2009.
- /DIN 01/ DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung; Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. März 2001.
- /DIN 05/ Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. April 2005.
- /EBE 09/ Eberth, S., Müller-Hoeppe, N.: Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salinar auf andere Wirtsgesteine. Übersicht, FuE-Vorhaben (FKZ 032 E 9521), DBE TECHNOLOGY GmbH, Dezember 2009.
- /ECK 76/ Eckart, D., Hüls, W., Klemm, T.: Geomechanische Untersuchung der Stabilität von Schotterschichten und -böschungen zur Sicherung von Versatzsäulen in Schächten. Neue Bergbautechnik, Vol. 6, No. 8, August 1976.

- /ENG 89/ Engelmann, H.-J.: Mechanisches Verhalten von Salzbeton unter Berücksichtigung des Einsatzes als Dammbaumaterial in einem Endlagerbergwerk. Dissertation, D83, FB 16 Bergbau und Geowissenschaft, TU Berlin, 1989.
- /ENG 11a/ Engelhardt, H.J., Jobmann, M., Müller-Hoeppe, N.: Materialspezifikation für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Rev01, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 24.08.2011.
- /ENG 11b/ Engelhardt, H.J., Müller-Hoeppe, N.: Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth. Memo im Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, Oktober 2011.
- /GDA 97/ Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT): GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten. 3. Edition, Verlag Ernst & Sohn, 1997.
- /GLÄ 05/ Gläß, F.: Investigation of a Salt-Concrete seal in the Asse Salt Mine, Tucson, AZ: WM'05 Conference, Feb. 27- Mar. 3, 2005.
- /GRU 03/ Gruner, M., Elert, K.-H., Schwandt, A., Sitz, P.: Salztou - natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar, Kali- und Steinsalz. Vol. 2, S. 12-17, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 2003.
- /GSF 06/ GSF: Verfüll- und Verschlusskonzept für die Schließung der Tagesschächte 2 und 4 des Bergwerks Asse. GSF-KZL: 16/ERV/GH/BZ/0001/00, Stand 15.11.2006.
- /GSF 07a/ GSF: Aufgaben und Anforderungen. SB-775-1, GSF-KZL 10/77725/BSB/CC/BZ/0002/00, Stand 31.05.2007.
- /GSF 07b/ GSF: Bau von Strömungsbarrieren – Baubeschreibung. SB-775-1, GSF-KZL 10/77725/BSB/GH/LA/0005/00, Stand 31.05.2007.

- /GSF 07c/ Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Gebirgsmechanische Auslegungsrechnung für die Strömungsbarriere SB-775-1, GSF-KZL 10/77725/BSB/GC/BW/0003/00, GSF, Stand 30.04.2007.
- /GSF 07d/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Bautechnischer Nachweis SB-775-1. GSF-KZL 10/77725/BSB/GH/LD/0004/00, GSF, Stand 11.05.2007.
- /HAG 09/ Hagemann, S., Xie, M., Herbert, H.-J.: Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen. Projekt Morsleben PSP-Element 9M 232 100 51, Endlager Morsleben, GRS-A-3458, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, März 2009.
- /HAM 12/ Hammer, J., Fleig, S., Mingerzahn, G., Kühnlenz, T., Mertineit, M., Pusch, M., Schramm, M., Behlau, J., Zaretski, B., Hesser, J., Shao, H., Köthe, A., Vogel, P.: Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-273, ISBN: 978-3-939355-49-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /HER 07/ Herbert, H.-J.: Self-sealing backfill (SVV) – A salt based material for constructing seals in salt mines, 6th Conference of Saltmechanics (Saltmech 6): Hannover, 22 - 25 Mai 2007.
- /HER 12/ Herold, P., Müller-Hoeppe, N.: Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse – Grundlagen für die hyd-raulische Auslegung (Variante B1 und Variante A). Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, August 2012.
- /HEU 08/ Heusermann, S., Eickemeier, R.: Einfluss der Bewetterungstemperatur auf das mechanische Verhalten des Schachtes 1 im Erkundungsbergwerk Gorleben. Messen in der Geotechnik 2008, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 87, 2008.

- /HIR 99/ Hirsekorn, R.-P., Boese, B., Buhmann, D.: Modellierung der Konvergenz von Salzgestein in LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. GRS-157, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, Juni 1999.
- /HMG 08/ Helmholtz Zentrum München: Bestimmung des Ausbreitwinkels vom Sorelbeton nach Rezeptur A1. Dokumentation, 9 Seiten, BSB/DOK/Ausgabe 07/02.2008, 2008.
- /HUR 97/ Hurtado, L.D., Knowles, M.K., Kelley, V.A., Jones, T.L., Ogintz, J.B., Pfeifle, T.W.: WIPP Shaft Seal System Parameters Recommended to Support Compliance Calculations. Sandia Report DAND97-1287*UC-721, December 1997.
- /ISI 08/ Kreienmeyer, M., Lerch, C., Polster, M., Tholen, M.: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Arbeitspaket AP 5. FKZ 02 E 10065, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, April 2008.
- /JES 95/ Gefrierschächte Gorleben. Editor: Jessberger, H.L., Balkema: Rotterdam, Brookfield, 1995.
- /KAM 11/ Kamlot, P., Brückner, D., Bodenstein, W., Naumann, D.: Indexversuche zur Bestimmung des uniaxialen und isotropen triaxialen Relaxationsverhaltens von Sotelbeton A1. Auftrag - Nr. 10/2011, 10 Seiten, Institut für Gebirgsmechanik (IfG) GmbH: Leipzig, 21.04.2011.
- /KAM 12/ Kamlot, P., Weise, D., Gärtner, G., Teichmann, L.: Drift sealing elements in the Asse II mine as a component of the emergency concept – assessment of the hydro-mechanical functionality, Taylor & Francis, London, The Mechanical Behavior of Salt: 7th Conference (SaltMech7): Paris, France, 2012.

- /KID 97/ Kiefer, D.: Sicherheitskonzept für Bauten des Umweltschutzes. ISBN: 978-3-410-65681-4, Deutscher Ausschuss für Strahlbeton (DAfStb), Heft 481: Berlin, 1997.
- /KLI 11/ Klinge, H.: Projekt Gorleben, Geologische und hydrogeologische Grundlagen für die Planung der Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /KNO 05/ Knoll, P.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV. Abschlussbericht, GTS, FuE Vorhaben (FKZ 02 C 0942), März 2005.
- /KNO 10/ Knoll, P., Finder, M., Kudla, W.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV, Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. Zusammenfassender Abschlussbericht, FuE-Vorhaben (FKZ 02 C 1204), Grube-Teutschenthal-Sicherungs-GmbH, December 2010.
- /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.
- /KOE 98/ Koenders, E.A.B., van Breugel, K.: Numerical modelling of self-desiccation of hardening cement paste. HERON 42.2, 1998.
- /KRE 80/ Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens, Band 1: Anorganische Chemie. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.
- /LAN 64/ Lancaster, F.H.: Report on Research into Underground Plougs. Research Report No.27, Transvaal and Orange Free State Chamber of Mines, Research Organisation: Johannesburg, 1964.

- /LAR 13/ Larue, J., Balthes, 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.
- /LEI 07/ Leitfaden für das Verwahren von Tagesschächten. [Sammelblatt der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung 6, Az.: 86.18.13-1-1-8-35], Stand vom 05.12.2007, erreichbar unter: <http://esb.bezreg-arnsberg.nrw.de>, zitiert am 08.07.2013.
- /LEU 07/ Leusmann, T., Engelhardt, H.J.: The Mechanical Behavior of Building Materials Based on the hydration of Evaporite Minerals, 6th Conference of Saltmechanics (Saltmech 6): Hannover, 22 - 25 Mai 2007.
- /LIN 12/ Linkamp, M., Müller-Hoeppe, N., Engelhardt, H.J.: Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer. Arbeitspaket AP 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Rev 02, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2012.
- /MAU 07/ Mauke, R., Müller-Hoeppe, N., Wollrath, J.: Planning Assessment, and Construction of a Drift Seal in a Salt Repository – Overview of Investigations, Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case: Design Confirmation and Demonstration, OECD/NEA, Workshop Proc. : Tokyo, Japan, 2007.
- /MAU 12/ Mauke, R., Stahlmann, J., Mohlfeld, M.: In-situ verification of a drift system in rock salt – operating experience and preliminary results, Taylor & Francis, London, The Mechanical Behavior of Salt: 7th Conference (SaltMech7): Paris, France, 2012.
- /MEY 02/ Meyer, T., Herbert, H.-J., Schmidt-Döhl, F., Dettmer, F.: Zementkorrosion. Projekt Morsleben PSP-Element 9M 232 200 - 11/12, Abschlussbericht von GRS und iBMB, GRS-A-3034, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, April 2002.

- /MEY 03/ Meyer, T., Herbert, H.-J., Schmidt-Döhl, F.: Endlager Morsleben, Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen. Verfahrensunterlage P 180, PFV zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, 2003.
- /MEY 08a/ Meyer, T., Herbert, H.-J.: Modelltheoretische Untersuchung der Umlösekapazität von IP21-Lösung bei der Korrosion von Salzbeton. Projekt Morsleben PSP-Element 9M 232 100 51, GRS-A-3384, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, Mai 2008.
- /MEY 08b/ Meyer, T., Teichmann, L., Heydorn, M.: Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Messen in der Geotechnik 2008, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Vol. 87, 2008.
- /MIS 02/ Mischo, H.: Untersuchungen an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge. Dissertation, TU Clausthal, 2002.
- /MOH 64/ Mohr, F.: Schachtbautechnik. Hermann Hübener Verlag KG: Goslar, 1964.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, 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.
- /MÜH 99/ Mühlbauer, J.: Numerische Untersuchungen zum mechanischen Reaktionsverhalten des Dichtsystems im Bohrschacht. Forschungsprojekt Schachtverschluß Salzdetfurth II, Versuch Dichtsystem Bohrschacht, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, September 1999.

- /MÜL 99/ Müller-Hoeppe, N., Krone, J.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren in einem Endlager. Abschlussbericht (FKZ 02 E 9087), DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 1999.
- /MÜL 00/ Müller-Hoeppe, N., Krone, J., Niehues, N., Raitz von Frenzt, R.: A new integrated approach to demonstrate the safe disposal of high-level radioactive waste and spent nuclear fuel in a geological repository, International Atomic Energy Agency (IAEA), Proc. Int. Conf. Safety of Radioactive Waste Management: Cordoba, Spain, 13-17 März 2000.
- /MÜL 04/ Müller, H.S.: DIN 1045-1: Aus der Praxis für die Praxis. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Vol. 52, 2004.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N.: Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes 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.
- /MÜL 12b/ Müller-Hoeppe, N.: Mechanische Vorbemessung des Schachtverschlusses Gorleben 1. Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, März 2012.
- /MÜL 12c/ 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 83/ Müller-Vonmoos, K., Kahr, G.: Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel. NTB 83-12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Schweiz, Dezember 1983.

- /NAG 02/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Projekt Opalinuston, NTB 02-02: Wettingen, Schweiz, Dezember 2002.
- /NAU 06/ Naumann, D., Bodenstein, W.: Ergebnisse gesteinsmechanischer Untersuchungen an Proben mit Kontaktflächen zwischen Steinsalz und Salzbeton sowie kompaktem Salzbeton des ASSE-Vordamms. Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, Oktober 2006.
- /OCZ 96/ Richtlinien des Oberbergamtes in Clausthal–Zellerfeld für das Verfüllen und Abdecken von Tageschächten vom 15.02.1996-11.2-10.2-3/95II-Bllf5.2-II, Clausthal-Zellerfeld 1996.
- /PAR 99/ Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J.: User's Guide to PHREEQC (Version 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigation Report 99-4259, 312 Seiten, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey: Denver, 1999.
- /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.
- /RÖH 05/ Röhlig, S.: Zwangsspannungen infolge Hydratation. ISBN 3764004355, Vbt Verlag Bau U. Technik, Juni 2005.
- /SAL 92/ Salzer, K., Schmidt, M.W.: Gebirgsmechanische und geotechnische Empfehlungen und Grundsätze zur sicheren Verwahrung von Tageschächten des Salzbergbaus im Südharz-Kalirevier: Gemeinschaftsarbeit des Institus für Gebirgsmechanik mit dem Institut für Tief Lagerung. Institut für Gebirgsmechanik, Institut für Tief Lagerung: Braunschweig, 1992.

- /SCH 94/ Schneider, K.-J.: Bautabellen für Ingenieure mit europäischen und nationalen Vorschriften. 11. Edition, ISBN 3804134467, Werner Verlag, 1994.
- /SCH 95/ Schmidt, M.W., Fruth, R., Stockmann, N.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Vorprojekt Forschungsbergwerk Asse, GSF-Bericht 32/95, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit (GSF): Neuherberg, 1995.
- /SCH 04/ Schreiner, W., Brückner, D.: Kompaktionsverhalten und mechanische Eigenschaften eines mit Schutzfluid gefluteten und komprimierten Ronnenbergversatzes. Ergebnisbericht, Memorandum 02/04, 29 Seiten, Institut für Gebirgsmechanik (IfG) GmbH: Leipzig, 23. April 2004.
- /SMO 88/ Smolctzyk, U. (Editor): Grundbau-Taschenbuch, 3. Edition, 1988.
- /TEC 10/ DBE TECHNOLOGY GmbH: Schachtanlage Asse, Strömungsbarriere SB-775-1, Nachweis der Funktionsfähigkeit. Abschlussdokumentation, KZL:A/AJ/HY/GH/FT/0002/00, Stand 03.12.2010.
- /WAG 05/ Wagner, K.: Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke im Salinargebirge. Dissertation, TU-Bergakademie Freiberg: Freiberg, 2005.
- /WEI 06/ Weise, D., Kamlot, P., Brückner, D., Naumann, D.: Abschlussbericht zu laborativen Voruntersuchungen an Sorelbetonproben der Chargen 1 bis 26. Auftrag Nr. B IfG 16/2005, Institut für Gebirgsmechanik (IfG) GmbH: Leipzig, 1.11.2006.
- /WEI 11/ Weise, D., Naumann, D., Bodenstein, M.: Laborbericht zur Untersuchung der Haftzug- und Scherfestigkeit der Kontaktfläche Steinsalz – Sorelbeton A1. 62 Seiten, Auftrag Nr. B IfG 61 / 2010, in Freigabe, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 03.03.2011.

- /WIE 12/ Wieczorek, 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.
- /WIL 08/ Wilsnack, T., Sitz, P., Heinemann, K.-H., Rumphorst, K., Hunstock, F.: Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. Kali und Steinsalz, No. 3, S. 24-35, 2008.
- /WOL 03/ Wolery, T.W., Jarek, R.L.: Software User's Manual EQ 3/6. Version 8.0, U.S. Department of Energy: Las Vegas, 2003.
- /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.
- /XIE 12/ Xie, M., Herbert, H.-J.: Geochemical analysis of the sealing system. Bericht zum Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, Februar 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Grobstrukturplan zur vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben, Stand 2010	3
Abb. 2.1	Position der Schächte und der vier Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord auf der Einlagerungssohle /BOL 11/	6
Abb. 2.2	Geologie – Schnittriss entlang Querschlag 1 West /BOR 02/	10
Abb. 2.3	Geologie – Schnittriss entlang Querschlag 1 Ost /BOR 02/	11
Abb. 2.4	Geologie – Schnittriss zwischen den Schächten Gorleben 1 und Gorleben 2 /BOR 02/	12
Abb. 2.5	Geologie – Sohlenriss 840 m-Sohle /BOR 02/	13
Abb. 2.6	Geologie – Sohlenriss 880 m-Sohle /BOR 02/	14
Abb. 2.7	Schacht Gorleben 1, wasserdichter Ausbau im Bereich des Salzspiegels (Quelle: DBE).....	17
Abb. 2.8	Schacht Gorleben 1, wasserdichter Ausbau /JES 95/	18
Abb. 2.9	Streckenquerschnitt (Mindestprofile) Richtstrecke Süd (Streckenverschluss Ost und West) /BOL 11/	19
Abb. 2.10	Streckenquerschnitt (Mindestprofile) Richtstrecke Nord (Streckenverschluss Nord und Mitte) /BOL 11/	20
Abb. 2.11	Schachtverschluss Salzdetfurth. Bestandteile des binären Bentonitgemisches und eingebauter Zustand /WIL 08/	27
Abb. 2.12	Betonage des ASSE-Vordamms (Quelle: GSF)	27
Abb. 2.13	Einbringen des Sorelbetons A1 in eine Widerlagerbox /BFS 09/.....	28
Abb. 2.14	Handverstopfen des Firstspaltes /EBE 09/, /GLÄ 05/.....	30
Abb. 3.1	Schacht Gorleben 1	35

Abb. 3.2	Funktionsentwurf Schachtverschluss Gorleben 1.....	36
Abb. 3.3	Darstellung eines realisierten Streckenverschlusses (SB-775-1) /TEC 10/	46
Abb. 3.4	Konstruktive Gestaltung der Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord /HER 12/	47
Abb. 4.1	Struktur des technischen Funktionsnachweises für das Verschlussystem.....	64
Abb. 5.1	Vergleich von Porositäts-Zeitverläufen mit Salzgrus versetzter Strecken bei unterschiedlichen Randbedingungen /CZA 12/	68
Abb. 5.2	Porositäts-Permeabilitätsbeziehung für naturtrockenen Salzgrus (orange) und feuchten Salzgrus (blau) /WIE 12/	69
Abb. 7.1	Veränderung des Chemismus einsickernder Regenwässer in den verschiedenen Dichtelementen des Schachtverschlusses (Regenwasserfolge) /XIE 12/	80
Abb. 7.2	Veränderung des Chemismus einsickernder Gipshuttlösungen in den verschiedenen Dichtelementen des Schachtverschlusses (Gipshutfolge) /XIE 12/.....	81
Abb. 7.3	Zusammenhang zwischen dem Quotienten des dynamischen und des statischen Elastizitätsmoduls und dem Steifemodul /SMO 88/	102
Abb. 8.1	Funktionsentwurf Schachtverschluss Gorleben 1 (nach Vorbemessung)	111
Abb. 10.1	Schematische Segmentstruktur für den Schachtverschluss (LOPOS- Modell).....	119
Abb. 10.2	Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; intakter Schachtverschluss	123
Abb. 10.3	Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; intakter Schachtverschluss	123
Abb. 10.4	Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; intakter Schachtverschluss	124

Abb. 10.5	Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; intakter Schachtverschluss	124
Abb. 10.6	Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; Schachtverschlussversagen	129
Abb. 10.7	Lösungsvolumina in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; Schachtverschlussversagen	129
Abb. 10.8	Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses; obere Segmente; Schachtverschlussversagen	130
Abb. 10.9	Druckverläufe in Komponenten des Schachtverschlusses und im Infrastrukturbereich; untere Segmente; Schachtverschlussversagen	130
Abb. 10.10	Schematische Segmentstruktur für das Grubengebäude der Streckenlagerung (LOPOS-Modell)	135
Abb. 10.11	Lösungs- und Porenvolumina im Infrastrukturbereich und in angrenzenden Segmenten; die Porenvolumina sind gestrichelt dargestellt	138
Abb. 10.12	Druckverläufe im Infrastrukturbereich und in angrenzenden Segmenten	139
Abb. 10.13	Porositätsentwicklung in ausgewählten Richtstrecken	141
Abb. 11.1	Temperatur-Zeitverläufe an den Lokationen der Streckenverschlüsse /BOL 12/	146

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Hydrogeologische Charakterisierung des Deckgebirges im Bereich des Schachtes Gorleben 1 /KLI 11/	15
Tab. 2.2	Hydrogeologische Charakterisierung des Deckgebirges im Bereich des Schachtes Gorleben 2 /KLI 11/	16
Tab. 3.1	Zusammenstellung der Funktionselemente im Salinarteil des Schachtverschlusses Gorleben 1 und ihre Materialspezifikation und Dicke /MÜL 12a/	42
Tab. 4.1	Bemessungssituationen und charakteristische Merkmale	52
Tab. 4.2	Initial-FEP (SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“).....	55
Tab. 4.3	Weniger wahrscheinliche FEP (SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“)	55
Tab. 4.4	Strukturierung der Initial-FEP für den technischen Funktionsnachweis (BS = Bemessungssituation, E = Einwirkung, W = Widerstand)	57
Tab. 4.5	Strukturierung der weniger wahrscheinlichen FEP für den technischen Funktionsnachweis (BS = Bemessungssituation, E = Einwirkung, W = Widerstand)	58
Tab. 4.6	Zu berücksichtigende Alternativszenarien.....	60
Tab. 7.1	Lösungsfolge aus den Reaktionen zwischen Lösungen und Feststoffphasen im Schacht.....	82
Tab. 7.2	Chemische Zusammensetzung der Deckgebirgslösungen /XIE 12/	84
Tab. 7.3	Chemische Zusammensetzung der Feststoffphasen /XIE 12/	84
Tab. 7.4	Umlösekapazität der Regenwasserfolge gegenüber Normalbeton (R1), Salzbeton (R4) und Sorelbeton (R6).....	86
Tab. 7.5	Umlösekapazität der Gipshutfolge gegenüber Normalbeton (G1), Salzbeton (G4) und Sorelbeton (G6).....	86
Tab. 7.6	Kenngößen zur Ermittlung der erforderlichen Nachschnitttiefe	92

Tab. 7.7	Gewählte Nachschnitttiefen	92
Tab. 7.8	Angaben zum Festigkeitsverhalten (Bemessungswerte) sowie Angaben zur Querdehnzahl (Mittelwerte), vgl. /MÜL 12b/	95
Tab. 7.9	Fiktive Widerlagerlängen der Dichtelemente aus Salzbeton und Sorelbeton	95
Tab. 7.10	Ausgewählte Kennwerte für das Verformungsverhalten /WAG 05/ /SCH 94/, /MÜH 99/ und Dichte /MÜL 12a/	98
Tab. 7.11	Ausgewählte Kenngrößen für das hydraulische Verhalten /MÜL 12a/ /ENG 11a/	106
Tab. 8.1	Geometrische Angaben zum modifizierten Funktionsentwurf (Modifikationen rot gekennzeichnet)	112
Tab. 8.2	Vergleich geometrischer und wirksamer Größen des modifizierten Funktionsentwurfes (Modifikationen rot gekennzeichnet)	113
Tab. 9.1	Erstellung Verschlussystem – Bauablauf	115
Tab. 10.1	Kenndaten der Komponenten des Schachtverschlusses /MÜL 12a/	120
Tab. 10.2	Modelldaten (LOPOS) der Komponenten des Schachtverschlusses	121
Tab. 10.3	Maximaldrücke und Zeitpunkte ihres Auftretens in den Komponenten des Modellverschlusses; intakter Schachtverschluss	125
Tab. 10.4	Modelldaten (LOPOS) der Komponenten des Schachtverschlusses bei Schachtverschlussversagen (Änderungen gegenüber dem intakten Schachtverschluss sind rot markiert)	127
Tab. 10.5	Zeitpunkt des Volllaufens der Komponenten des Schachtverschlusses bei Schachtverschlussversagen	131
Tab. 10.6	Maximaldrücke und Zeitpunkte ihres Auftretens in den Komponenten des Modellverschlusses	132
Tab. 10.7	Kenndaten ausgewählter Segmente des Grubengebäudes /MÜL 12a/	134
Tab. 10.8	Modelldaten (LOPOS) ausgewählter Segmente des Grubengebäudes ..	136

Tab. 10.9	Zeitpunkte des errechneten Volllaufens von Segmenten des Grubengebäudes	138
Tab. 10.10	Maximaldrücke und Zeitpunkte ihres Auftretens in ausgewählten Segmenten des Grubengebäudes	140

A Autogenes Schwinden von Beton/Mörtel

Bei der Hydratation eines Betons oder Mörtels wird Wasser der Baustofflösung in der Kristallstruktur von Hydratationsprodukten fixiert. Das Volumen der Hydratations- oder Reaktionsprodukte ist im Vergleich zum Volumen der Ausgangsstoffe geringer. Dieses chemische Schwinden bestimmt im Wesentlichen das autogene Schwinden, d. h., die nach außen messbare Verformung des Baustoffs, sofern kein Stoffaustausch (Carbonatisierung, Trocknen) mit der Umgebung erfolgt.

Das autogene Schwinden eines konventionellen Betons ist demnach maßgeblich abhängig vom Verhältnis der Bindemittel (Zement, Betonzusatzstoff Typ II) und Anmischwasser bzw. Lösung sowie von den Anteilen an Zementleim bzw. „Zementstein“ (inkl. Betonzusatzstoff Typ II) und der chemisch inerten Gesteinskörnung. Bei einem Verhältnis von Wasser zu Zement (W/Z-Wert) von 0,25 wird das Wasser vom Zement chemisch fixiert. Das chemische Schwinden nimmt daher mit einem Anstieg des W/Z-Wert $> 0,3$ ab. Diese Abhängigkeit wird jedoch „abgeschwächt“, da mit zunehmendem W/Z-Wert der final erreichbare Hydratationsgrad ansteigt (Abb. A.1). Da sich das Volumen der Gesteinskörnung bei der Hydratation nicht verändert, nimmt das autogene Schwinden mit dem Anteil an Gesteinskörnung ab (Abb. A.2).

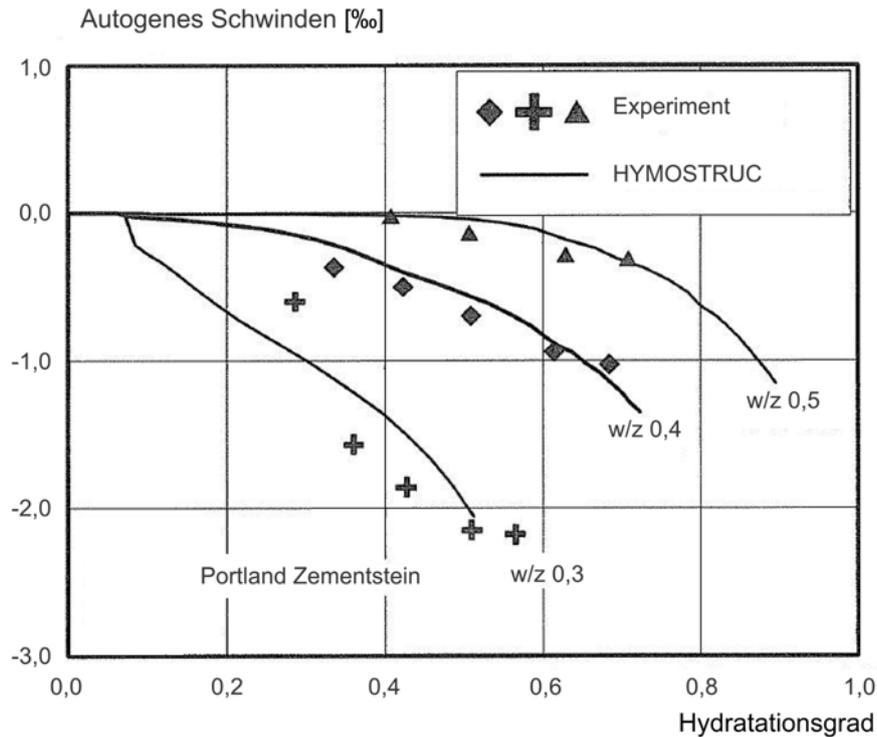


Abb. A.1 Autogene Schwindverformung von Zementstein in Abhängigkeit des Hydratationsgrades /KOE 98/

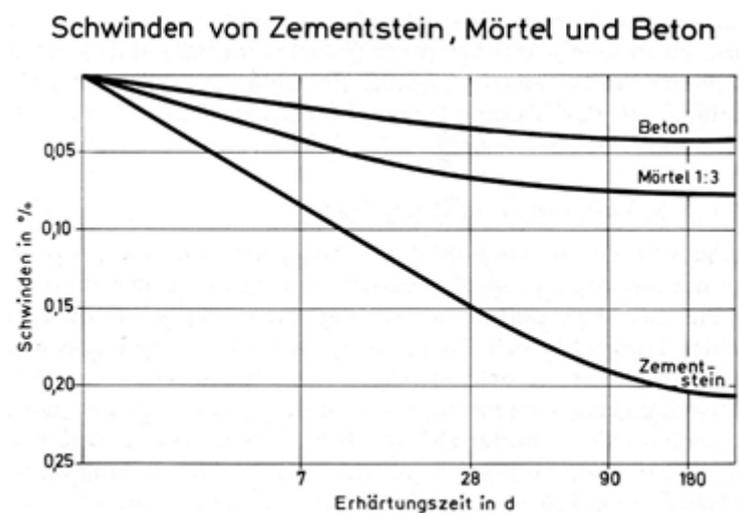


Abb. A.2 Schwinden in Abhängigkeit der Erhärtungszeit von Zementstein, Beton und Mörtel /KRE 80/

Die Referenzrezeptur für seigere Dichtelemente (Salzbeton Typ Asse) mit einem W/Z-Wert von 0,4 und einem Volumenanteil des Zementleims bzw. -steins von rund 13 % zeigt Tab. A.1. Anhand dieser Daten und der baustofftechnologischen Sachverhalte

konventioneller Betone (ohne Salz) ist es möglich, die Schwindneigung des Salzbetons zu bewerten und die möglicherweise risserzeugende Schwindverformung grob abzuschätzen.

Tab. A.1 Zusammensetzung des Salzbetons Typ Asse mit berechneten Volumenanteile der Ausgangsstoffe nach dem Mischen /ENG 11a/

	Massenanteile in Prozent	Kilogramm pro Kubikmeter	Volumenanteile in Prozent
Hochofenzement	18,32	380	ca. 12,7
Steinsalzgrus	72,65	1.486	ca. 69,7
NaCl-Lösung	10,03	208	ca. 17,6
Summe	100,00	2.074	100,00

Der W/Z-Wert konventioneller Betone liegt meist zwischen 0,4 und 0,7. W/Z-Werte von 0,4 werden zumeist von hochfesten Betonen unterschritten. Die Referenzrezeptur liegt am unteren Ende dieser Bandbreite. Der Volumenanteil der Feinkornsuspension beträgt bei der Referenzrezeptur rund 30 Vol.-%. Dieser Wert ist auch im Vergleich zu konventionellen Betonen niedrig. Damit der Steinsalzgrus vollständig von Zementleim bzw. -stein umschlossen wird (Abb. A.3), muss die Korngrößenverteilung des Steinsalzgruses in Bezug auf die Regelsieblinien günstig sein. Anzustreben ist eine Idealsieblinie nach Fuller mit einem Exponenten von 0,4.

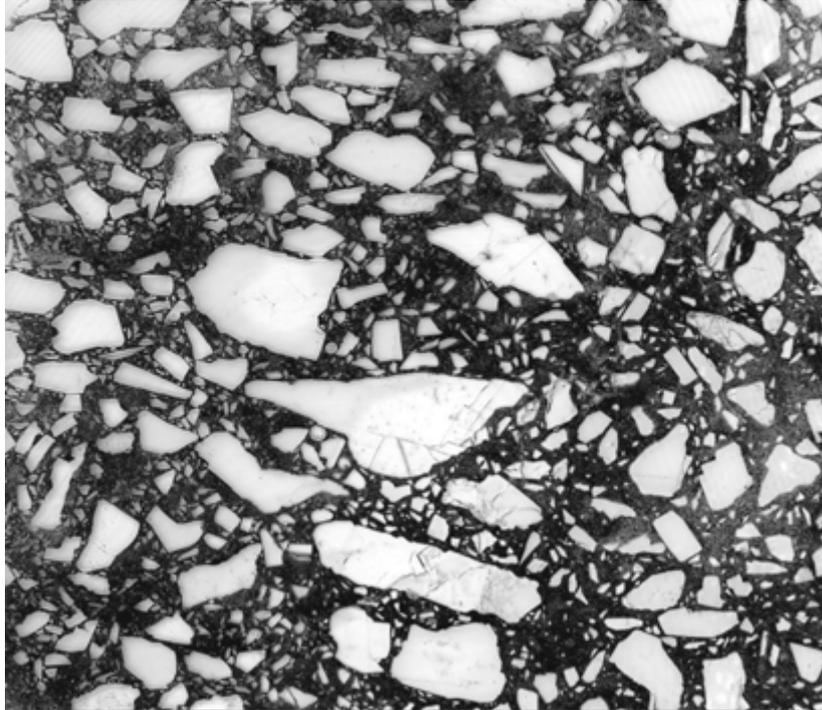


Abb. A.3 Mikroskopische Aufnahme des Salzbetons Typ Asse /BFS 08/

Schwindverformungen konventioneller Normalbetone variieren im Bereich von 0,1 bis 0,5 mm/m. In Folge der maßgeblichen Materialeigenschaften WZ-Wert und dem Verhältnis von Zementleim zu Steinsalzgrus sollte die Schwindverformung der Referenzrezeptur in diesem üblichen Bereich liegen (nach Abb. A.1: $1,4 \text{ ‰} \cdot 0,3 \text{ Vol.-%} = 0,42 \text{ ‰}$).

Eine Alternative zur Bestimmung von Schwindverformungen bietet die DIN 1045-1 (siehe /MÜL 04/). Die Grundlage sind die Gleichungen (A.1), (A.2) und (A.3) mit $\varepsilon_{\text{cas}}(t)$, dem zeitabhängigen Schwinden/Schrumpfen, $\varepsilon_{\text{cas}0}$, dessen Grundwert bzw. der Schwindverformung zum Ende der Hydratation sowie α_{as} , einem Beiwert, der zementabhängig ist und bei Hochofenzement 800 beträgt. Die Funktion $\beta_{\text{as}}(t)$ der Gl. (A.3) kann vernachlässigt werden, da sie zum Abschluss der Hydratation einen Wert von 1 annimmt.

$$\varepsilon_{\text{cas}}(t) = \varepsilon_{\text{cas}0}(f_{\text{cm}}) \cdot \beta_{\text{as}}(t) \quad (\text{A.1})$$

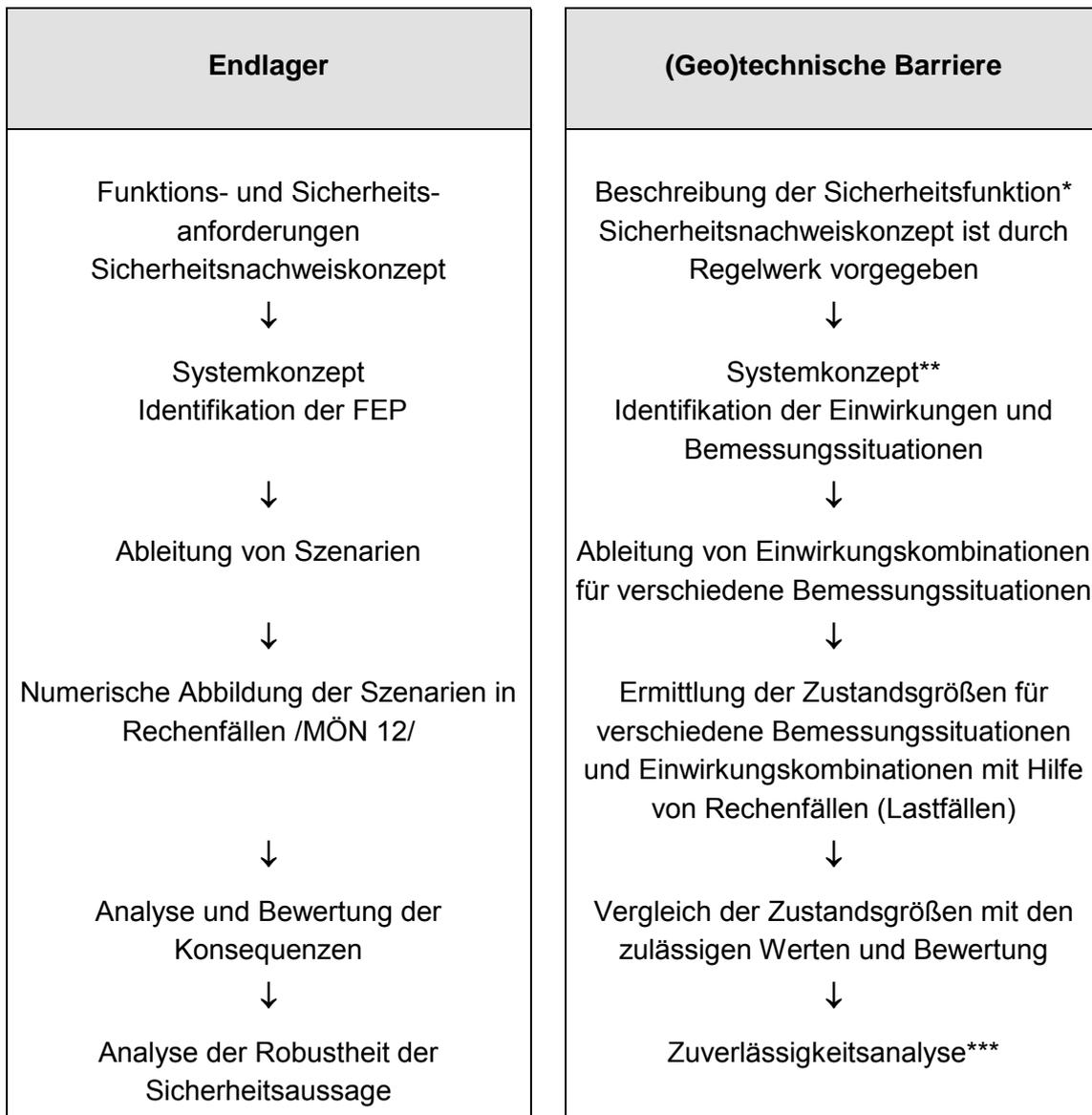
$$\varepsilon_{\text{cas}0}(f_{\text{cm}}) = -\alpha_{\text{as}} \left(\frac{f_{\text{cm}}/f_{\text{cm}0}}{6 + f_{\text{cm}}/f_{\text{cm}0}} \right)^{2,5} \cdot 10^{-6} \quad (\text{A.2})$$

$$\beta_{\text{as}}(t) = 1 - \exp\left(-0,2 \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^{0,5}\right) \quad (\text{A.3})$$

Bei Annahme einer Druckfestigkeit des Salzbetons f_{cm} von 25 MPa nach 28 Tagen und der Eingabe von 10 MPa als $f_{\text{cm}0}$ resultiert für ϵ_{cas} zum Abschluss der Hydratation ein Wert von 0,2 mm/m.

B Gegenüberstellung der Vorgehensweise bei der Sicherheitsanalyse für ein Endlager und beim Funktionsnachweis für eine geotechnische Barriere

In /EBE 09/ wurde eine vergleichende Gegenüberstellung der Vorgehensweise bei der Sicherheitsanalyse für ein Endlager gemäß schweizerischem Nachweiskonzept und der Vorgehensweise bei dem Nachweis von Sicherheitsfunktionen im Rahmen zuverlässigkeitsorientierter Sicherheitskonzepte gemäß Stand der Technik, die bei geotechnischen Barrieren zur Anwendung kommen und die im Wesentlichen in /CEN 10/, /CEN 09/ geregelt sind, gegeben. Die daraus abgeleiteten und hier geringfügig modifizierten Bearbeitungsstufen im Rahmen der Nachweisführungen zeigten die grundsätzliche Vergleichbarkeit des logischen Aufbaus der Nachweisführungen bei unterschiedlicher Begriffsbildung und Modifikationen in der Zuordnung der Bearbeitungsschritte zu den Bearbeitungsstufen. Abb. B.1 zeigt die Gegenüberstellung des dargestellten Ablaufs der Sicherheitsanalyse für ein Endlager im Salz, wie er im Rahmen der VSG gewählt wurde (vgl. Abb. 2.1), und der Vorgehensweise bei der Auslegung der geotechnischen Barrieren (Verschlüsse).



* das Sicherheitsnachweiskonzept ist durch Regelwerk vorgegeben

** enthält die Widerstände

*** i. d. R. nicht explizit betrachtet

Abb. B.1 Vergleich der Vorgehensweisen bei der Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager und den Nachweisen der Sicherheitsfunktion für (geo)technische Barrieren

(Geo)technische Barrieren sind Bestandteil des Endlagerkonzeptes/Systemkonzeptes. Deshalb sind für sie auch die FEP maßgeblich sowie die Szenarien auszuwerten. Wie beispielhaft in Tab. 4.4 und Tab. 4.5 für die integritätsverletzenden FEP dargestellt, können FEP Einwirkungen (Fluiddruck) und Systemkomponenten (Auflockerungszone) sein oder auch eine Bemessungssituation charakterisieren, z. B. vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses /BEU 12/. Da die Auslegung der (geo)technischen Barrieren zwangsläufig in Anlehnung an das technische Regelwerk /CEN 10/, /CEN 09/ er-

folgt, ist eine Restrukturierung der FEP erforderlich. Die Restrukturierung der FEP für den technischen Funktionsnachweis wurde in Kapitel 4.3 durchgeführt. Bzgl. der Bearbeitungsstufe Robustheit ist bei der Auslegung (geo)technischer Barrieren festzustellen, dass diese nicht explizit durchgeführt wird, da hinreichend pessimistische Datengrundlagen automatisch z. B. über das Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden. Dass die Fragestellung der Robustheit berücksichtigt wird, zeigt Prinzip (4) Abschnitt 2.1 in /CEN 10/, das lautet:

„Ein Tragwerk ist so auszubilden, dass durch Ereignisse wie

- Explosionen,*
- Anprall oder*
- menschliches Versagen*

keine Schadensfolgen entstehen, die in keinem Verhältnis zur Schadensursache stehen.“

Prinzip (4) in Abschnitt 2.1 ist die technische Definition von Robustheit.

C Nachtrag zur Konkretisierung der Vorbemessung für den Schachtverschluss Gorleben 1

Bei der Anbindung des geplanten Infrastrukturbereichs der Einlagerungssohle an den Schacht Gorleben 1 wurde festgestellt, dass diese nur im Teufenniveau 880 m erfolgen kann, wenn man die bisherigen Erkundungsergebnisse zu Grunde legt und weiterhin eine Trennung zwischen Infrastrukturbereich Einlagerungssohle und Erkundungssohle erzielen möchte. Prinzipiell ist auch eine Anbindung unterhalb des Schachttiefsten in 933 m Teufe denkbar, dieser Bereich ist jedoch bisher nicht erkundet. Deshalb wird im Folgenden ausschließlich die Anbindung in 880 m Teufe betrachtet.

Bei der Planung der Anbindung ist zu berücksichtigen, dass der bereits existierende Infrastrukturbereich in drei Teufeniveaus an den Schacht Gorleben 1 angeschlossen ist (vgl. Abb. C.1), und zwar auf der

- 840 m Erkundungssohle (Sohlenniveau in 840 m Teufe),
- 880 m Erkundungssohle (Sohlenniveau in 880 m Teufe) und
- 930 m Erkundungssohle (Sohlenniveau in 930 m Teufe), Schachtunterfahrung.

D. h., ein Teil des bereits heute vorhandenen Infrastrukturbereichs im z3 befindet sich unterhalb der Einlagerungssohle, deren Teufenniveau bei 870 m (Sohlenniveau) geplant ist.

Wie Abbildung Abb. 3.1, Abb. 2.5 und Abb. 2.6 entnommen werden kann, ist im interessierenden Teufenbereich zwischen 840 m Teufe und 880 m Teufe auch die Gorleben-Bank zweimal aufgeschlossen, ein erneuter Aufschluss der Gorleben-Bank in geringer Entfernung zum Schacht Gorleben 1 kann gemäß heutigem Stand der Erkundung bei Anbindung des Infrastrukturbereichs Einlagerungssohle in 880 m Teufe in südöstlicher Richtung vermieden werden, vgl. Abb. 2.5 und Abb. 2.6.

Wählt man diese Planung als Basis, sind aufgrund der Anbindungen des vorhandenen Infrastrukturbereichs an den Schacht 1 in drei Teufeniveaus für das 3. Dichtelement aus Sorelbeton drei Einzelelemente vorzusehen, vgl. Tab. C.1, Abb. C.2 und Abb. C.3, die hydraulisch parallel zueinander mögliche Verbindungen zwischen der Erkundungs- und Einlagerungssohle verschließen.

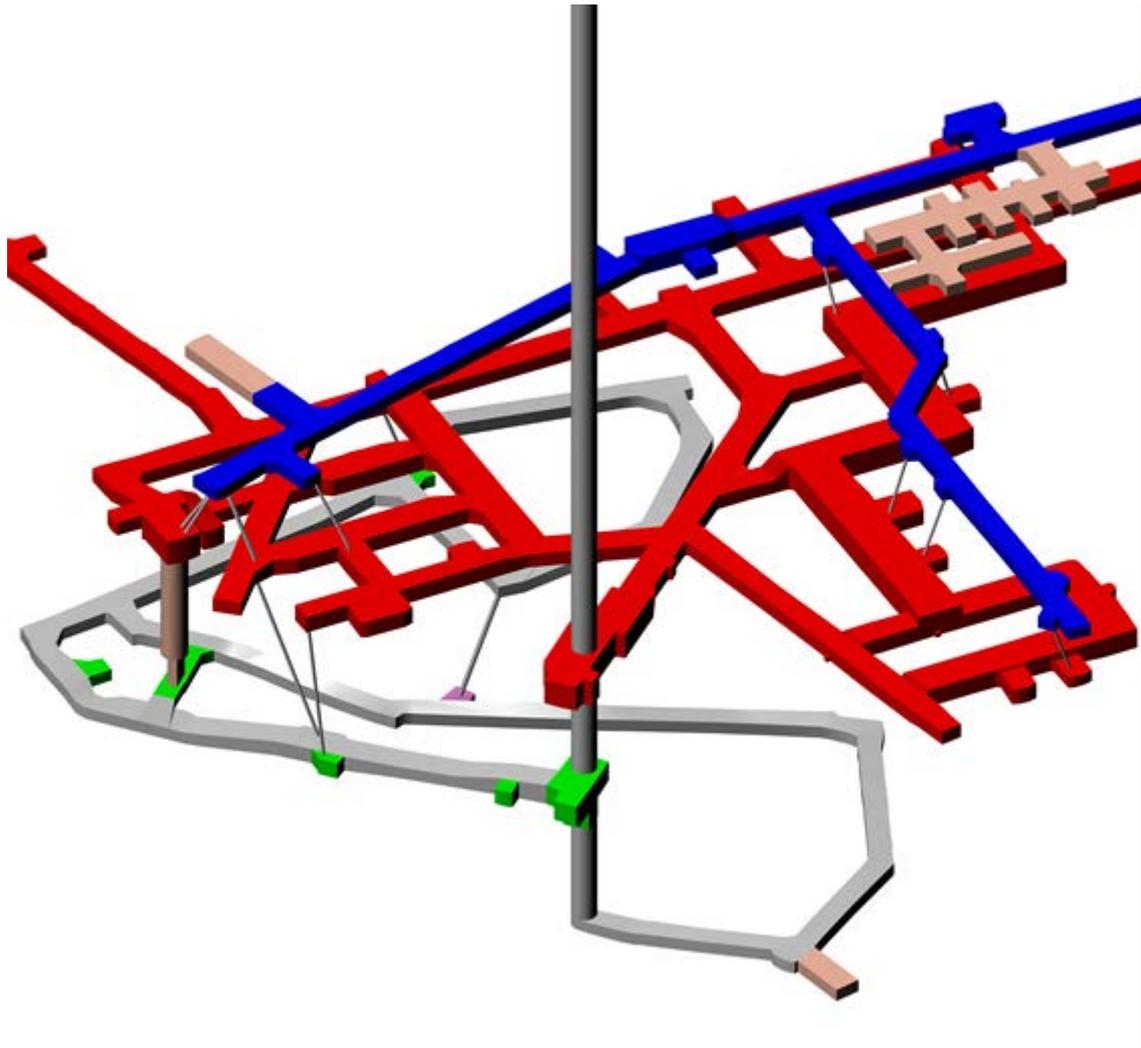


Abb. C.1 Infrastrukturbereich Erkundung im Bereich des Schachtes Gorleben 1 (blau: 1. Sohle, rot: 2. Sohle, grün: 3. Sohle, grau: Schrägstrecken, braun: Planung)

Für die Langzeitsicherheitsbetrachtungen ist die dreifache Anbindung des vorhandenen Infrastrukturbereichs Erkundung grundsätzlich vernachlässigbar. Im Referenzfall wird aufgrund der geringen Zutrittsmengen durch den Schacht zuerst das untere Element in 930 m Teufe beaufschlagt. Erst wenn der Infrastrukturbereich Erkundung bis in 880 m Teufe aufgefüllt ist, beginnt die Beaufschlagung des seitlichen Elementes und erst bei nahezu vollständiger Auffüllung des Infrastrukturbereichs Erkundung wird das obere Element beaufschlagt. Da die Lösungszutritte durch den Schacht im Referenzfall nur gering sind, ist nicht von einer vollständigen Auffüllung des Infrastrukturbereichs Erkundung auszugehen. Deshalb wird weiterhin nur von der Beaufschlagung eines Elementes ausgegangen, so dass sich für die Langzeitsicherheitsbetrachtungen im

Referenzszenarium nichts ändert. Im Rahmen von Variationsbetrachtungen ist es empfehlenswert, zusätzlich eine höhere (z. B. dreifache) Durchlässigkeit oder einen dreifachen Querschnitt zu betrachten, um die Dreiteilung des 3. Dichtelementes in drei Einzelemente konservativ abzubilden.

Im Falle der wenig wahrscheinlichen Szenarien wird von einem Ausfall des Schachtverschlusses ausgegangen, der durch eine um mehrere Größenordnungen erhöhte Durchlässigkeit des Schachtverschlusses abgebildet wird. Damit ist auch der Ausfall jedes Einzelementes des 3. Dichtelementes abgedeckt.

In Bezug auf die mechanische Vorbemessung der erforderlichen Widerlagerlängen erfolgt nachstehend aufgeführte abdeckende Ergänzung (Nachtrag).

Die erforderliche fiktive Widerlagerlänge des unteren Elementes des 3. Dichtelementes bei Ansatz eines Nachschnitts von 0,9 m und des Lösungsdruckes bis zur Tagesoberfläche einschließlich Meeresspiegelanstieg beträgt

$$L_{w,T} = 12,36 \text{ m} < \text{vorh. } L = 30 \text{ m}$$

$$L_{w,bz} = 6,49 \text{ m} < \text{vorh. } L = 30 \text{ m}$$

Damit ist die vorhandene Widerlagerlänge des unteren Elementes auch bei Ansatz des maximal möglichen Druckes ausreichend.

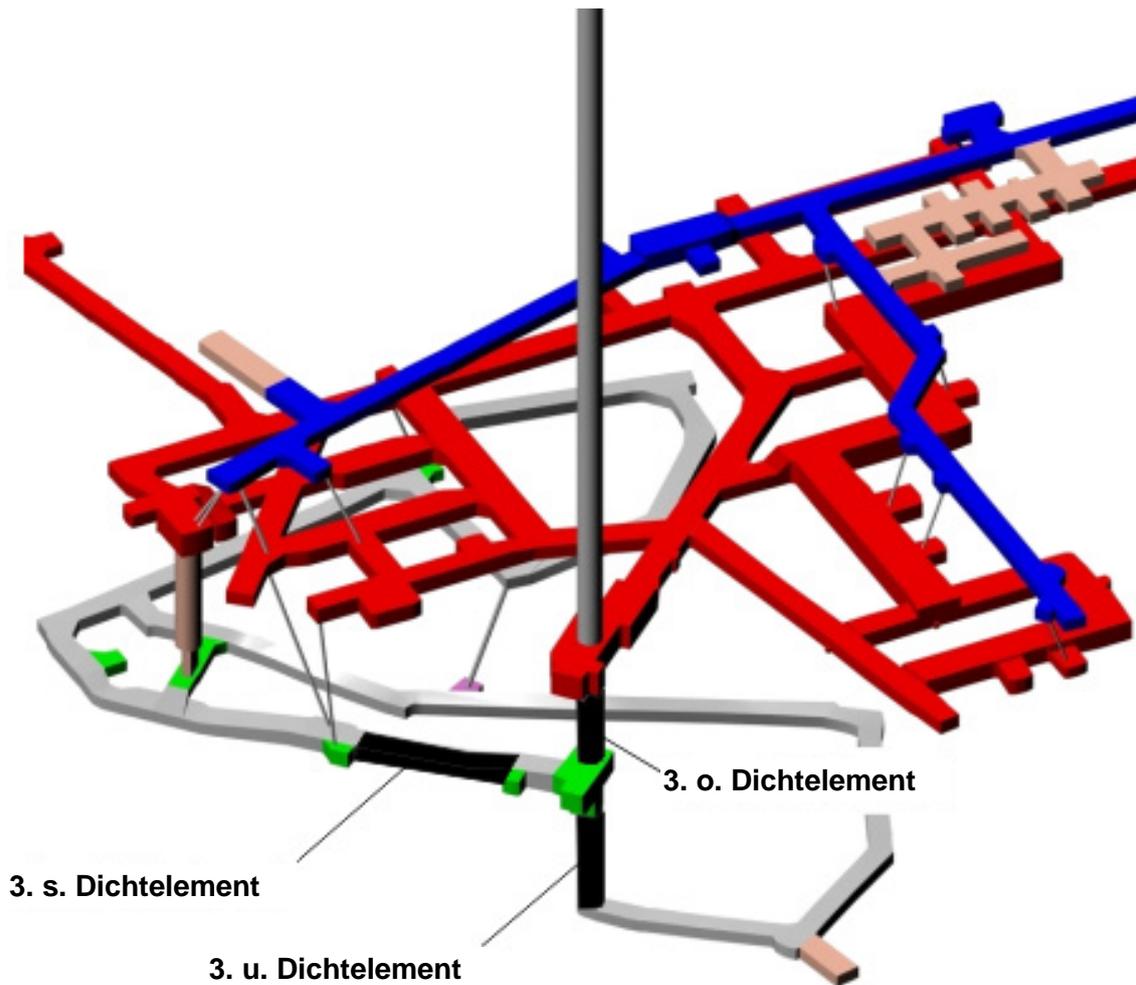


Abb. C.2 Infrastrukturbereich Erkundung im Bereich des Schachtes Gorleben 1 mit dreiteiligen Dichtelement

Tab. C.1 Geometrische und wirksame Größen des Funktionsentwurfs mit Anbindung Infrastruktur Erkundungssohle (weitere Modifikationen grün gekennzeichnet)

Funktions- element	Material	Geom. Länge	Wirks. Länge	Geom. Ø	Wirks. Ø	Anmer- kungen
Filter/Aufsättigung	Sand/Kies/ Basaltsplitt	36,5 m	36,5 m	7,63 m	7,63 m	
1. Dichtelement	Bentonit	60 m*	50 m*	8,63 m	8,83 m	Rest-ALZ, 1% Porosi- tät
Filter	Sand/Kies/ Basaltsplitt	14 m	14 m	7,63 m	7,63 m	
Gebirgsverbun- denes Widerlager dräniert	Salzbeton	12,5 m	12,5 m	8,63 m	8,63 m	Kein hy- draulischer Widerstand
Widerla- ger/Speicher	Basaltschot- ter	127,5 m	127,5 m	7,63 m	7,63 m	
Langzeitdichtung	Feuchter Salzgrus	50 m	50 m	7,63 m	7,63 m	
Opferschicht	Salzbeton	10 m	10 m	7,63 m	7,63 m	Ansatz er- höhter Permeabili- tät
Fiktives Widerlager	Salzbeton	25 m	25 m	8,83 m	8,83 m	Rest-ALZ, o. A.
2.Dichtelement	Salzbeton	70 m*	60 m*	8,83 m	9,03 m	Rest-ALZ 1% Porosi- tät
Fiktives Widerlager	Salzbeton	25 m	25 m	8,83 m	8,83 m	Rest-ALZ, o. A.
Widerla- ger/Speicher/ Auf- sättigung/ Behelfs- widerlager***	Basalt-/ Ser- petinitschot- ter, techn. Bischoffit	66 m	66 m	fiktiv 7,63 m		
3. o. Dichtelement	Sorelbeton	30 m*	20 m*	9,23 m	9,43 m	Rest-ALZ, 1% Porosi- tät
3. u. Dichtelement	Sorelbeton	30 m	30 m	9,43 m	9,63 m	
3. s. Dichte- lement***	Sorelbeton	50 m *	40 m*	9,23 m**	9,43 m**	
Widerlager***	Sorelbeton	3 m	3 m	fiktiv 7,63 m		

o. A ohne hydraulische Anforderungen, Nachschnitt erfolgt aus Gründen der Tragfähigkeit

* Berücksichtigung der Gorleben-Bank bei der wirksamen Länge

** Annahme

*** Angeschlossen an Infrastrukturbereich Erkundung

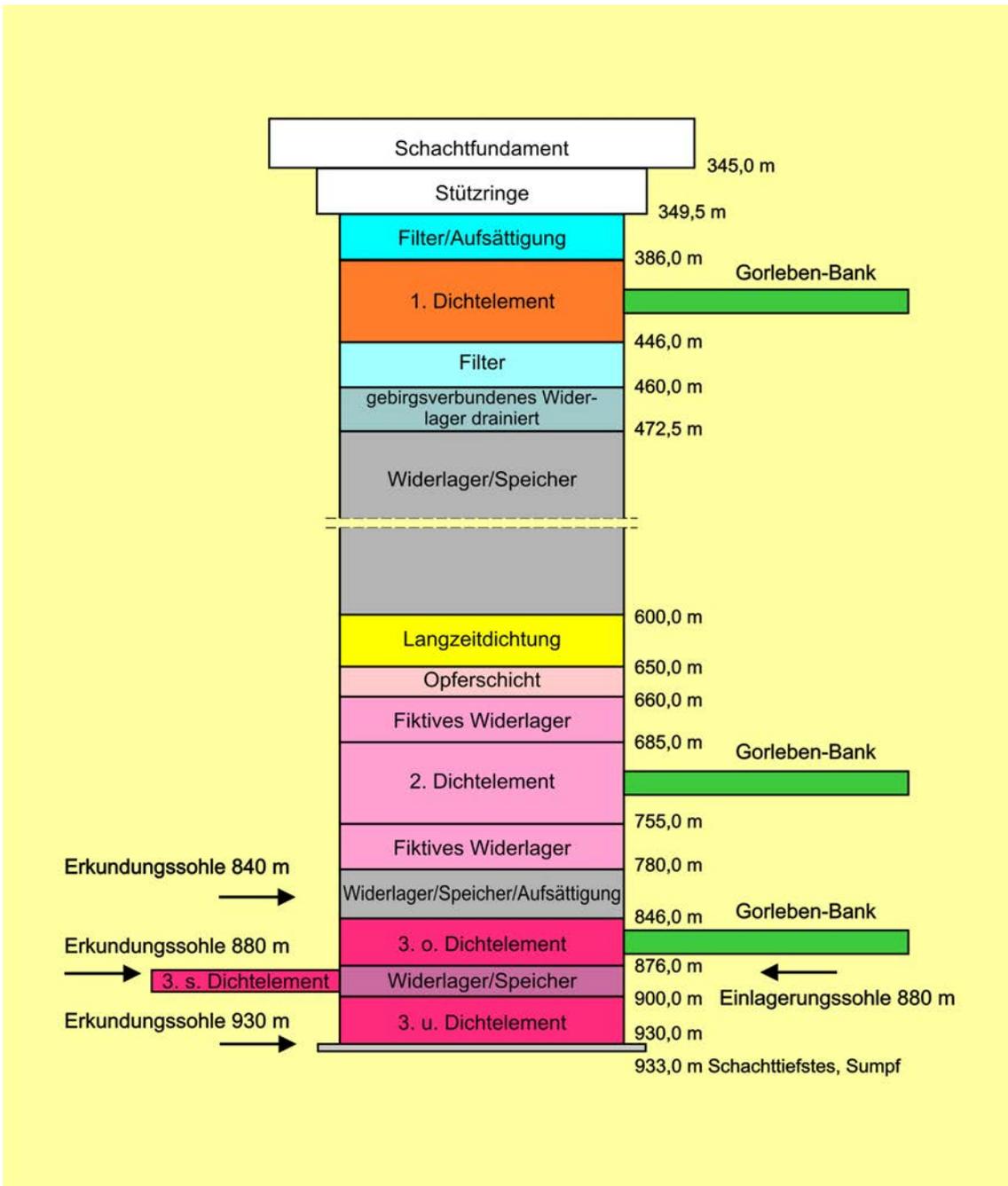


Abb. C.3 Funktionsentwurf Schacht Gorleben 1 mit Anbindung Infrastruktur in 880 m Teufe

Abbildungsverzeichnis der Anhänge

Abb. A.1	Autogene Schwindverformung von Zementstein in Abhängigkeit des Hydratationsgrades /KOE 98/	174
Abb. A.2	Schwinden in Abhängigkeit der Erhärtungszeit von Zementstein, Beton und Mörtel /KRE 80/	174
Abb. A.3	Mikroskopische Aufnahme des Salzbetons Typ Asse /BFS 08/	176
Abb. B.1	Vergleich der Vorgehensweisen bei der Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager und den Nachweisen der Sicherheitsfunktion für (geo)technische Barrieren.....	180
Abb. C.1	Infrastrukturbereich Erkundung im Bereich des Schachtes Gorleben 1 (blau: 1. Sohle, rot: 2. Sohle, grün: 3. Sohle, grau: Schrägstrecken, braun: Planung)	184
Abb. C.2	Infrastrukturbereich Erkundung im Bereich des Schachtes Gorleben 1 mit dreiteiligen Dichtelement.....	186
Abb. C.3	Funktionsentwurf Schacht Gorleben 1 mit Anbindung Infrastruktur in 880 m Teufe	188

Tabellenverzeichnis der Anhänge

Tab. A.1	Zusammensetzung des Salzbetons Typ Asse mit berechneten Volumenanteile der Ausgangsstoffe nach dem Mischen /ENG 11a/.....	175
Tab. C.1	Geometrische und wirksame Größen des Funktionsentwurfs mit Anbindung Infrastruktur Erkundungssohle (weitere Modifikationen grün gekennzeichnet)	187

**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

DBE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55

31224 Peine

ISBN 978-3-939355-63-2