

# Szenarientwicklung: Methodik und Anwendung

Bericht zum Arbeitspaket 8

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Erstellt von:





## **Szenarientwicklung: Methodik und Anwendung**

Bericht zum Arbeitspaket 8

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Thomas Beuth (GRS)  
Guido Bracke (GRS)  
Dieter Buhmann (GRS)  
Christian Dresbach (BGR)  
Siegfried Keller (BGR)  
Jürgen Krone (DBETEC)  
Andree Lommerzheim (DBETEC)  
Jörg Mönig (GRS)  
Sabine Mrugalla (BGR)  
Andre Rübel (GRS)  
Jens Wolf (GRS)

August 2012

Auf beiliegender CD-ROM:

- GRS - 284
- Anhänge A – D

### **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.

**GRS - 284**  
**ISBN 978-3-939355-60-1**

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

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

### **Ursprüngliche Zielsetzung**

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

### **Aktualisierte Zielsetzung**

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

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

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

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

### **Aktualisierte Projektplanung**

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

### **Projektpartner**

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

### **Arbeitspakete**

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

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

**Deskriptoren:**

Alternativszenarium, Annahmen, Entwicklung, FEP, Gorleben, Methodik, Referenzszenarium, Szenari-entwicklung, Wahrscheinlichkeit

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Begriffsbestimmungen.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Methodik der Szenarientwicklung .....</b>	<b>7</b>
3.1	Grundlagen.....	9
3.1.1	Rahmenbedingungen .....	9
3.1.2	Grundlegende Annahmen.....	11
3.1.3	Standortbeschreibung und geowissenschaftliche Langzeitprognose.....	12
3.1.4	Abfallspezifikation und Mengengerüst.....	13
3.1.5	Endlagerkonzepte.....	13
3.2	FEP-Katalog .....	14
3.3	Szenarien .....	15
3.3.1	Ableitung eines Referenzszenariums.....	15
3.3.1.1	Initial-FEP mit wahrscheinlichen Ausprägungen .....	16
3.3.1.2	Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport.....	20
3.3.2	Ableitung von Alternativszenarien.....	21
3.3.2.1	Alternativen zu spezifischen Annahmen .....	21
3.3.2.2	Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen .....	22
3.3.2.3	Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport.....	23
3.3.2.4	Weniger wahrscheinliche FEP .....	24
3.3.3	Kennzeichnung der Szenarien.....	24
3.4	Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen .....	26
3.5	Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle .....	30
<b>4</b>	<b>Ausgangssituation .....</b>	<b>33</b>
4.1	Geologie .....	33
4.2	Einlagerungsvarianten .....	35

4.2.1	Einlagerungsvariante AB1 .....	38
4.2.2	Einlagerungsvariante AB2 .....	45
4.2.3	Einlagerungsvariante AC .....	47
<b>5</b>	<b>Referenzszenarien für die Einlagerungsvarianten .....</b>	<b>49</b>
5.1	Randbedingungen .....	50
5.1.1	Klimabild .....	50
5.1.2	Spezifische Annahmen .....	53
5.2	Referenzszenarium R1 zur Einlagerungsvariante AB1 .....	55
5.2.1	Teilsystem „Nahfeld“ .....	55
5.2.1.1	Nahfeld im Ostflügel des Endlagers .....	56
5.2.1.2	Nahfeld im Westflügel des Endlagers .....	60
5.2.2	Teilsystem „Strecken und Schächte“ .....	61
5.2.2.1	Infrastrukturbereich und Schächte .....	62
5.2.2.2	Strecken im Ostflügel des Endlagers .....	66
5.2.2.3	Strecken im Westflügel des Endlagers .....	68
5.2.3	Teilsystem „Wirtsgestein“ .....	69
5.2.4	Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ .....	74
5.2.5	Radionuklidmobilisierung .....	76
5.2.6	Radionuklidtransport .....	79
5.2.7	Zeitliche Entwicklung von Aspekten .....	81
5.3	Referenzszenarium R2 zur Einlagerungsvariante AB2 .....	85
5.3.1	Teilsystem „Nahfeld“ .....	86
5.3.2	Teilsystem „Strecken und Schächte“ .....	89
5.3.3	Teilsystem „Wirtsgestein“ .....	90
5.3.4	Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ .....	92
5.3.5	Radionuklidmobilisierung .....	92
5.3.6	Radionuklidtransport .....	94
5.3.7	Zeitliche Entwicklung von Prozessen .....	95
5.4	Referenzszenarium R3 zur Einlagerungsvariante AC .....	95
5.4.1	Teilsystem „Nahfeld“ .....	96

5.4.2	Teilsystem „Strecken und Schächte“ .....	100
5.4.3	Teilsystem „Wirtsgestein“ .....	102
5.4.4	Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ .....	103
5.4.5	Radionuklidmobilisierung .....	104
5.4.6	Radionuklidtransport .....	106
5.4.7	Zeitliche Entwicklung von Prozessen .....	107
<b>6</b>	<b>Alternativszenarien.....</b>	<b>109</b>
6.1	Alternativszenarien zur Einlagerungsvariante AB1.....	109
6.1.1	Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen .....	109
6.1.1.1	Spezifische Annahme zur Klimaentwicklung .....	110
6.1.1.2	Spezifische Annahme zu Schacht- und Streckenverschlüssen .....	120
6.1.1.3	Spezifische Annahme zum Sicherheitsabstand .....	123
6.1.1.4	Spezifische Annahme zur Erkundungssohle .....	130
6.1.1.5	Radionuklidmobilisierung und -transport.....	134
6.1.1.6	Zusammenfassende Darstellung .....	135
6.1.2	Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP.....	136
6.1.2.1	Erdbeben .....	138
6.1.2.2	Diapirismus.....	138
6.1.2.3	Subrosion .....	140
6.1.2.4	Bildung kryogener Klüfte.....	141
6.1.2.5	Glaziale Rinnenbildung .....	142
6.1.2.6	Versagen eines Brennelement-Behälters.....	145
6.1.2.7	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen .....	146
6.1.2.8	Konvergenz .....	149
6.1.2.9	Fluiddruck.....	151
6.1.2.10	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien .....	151
6.1.2.11	Lageverschiebung des Schachtverschlusses.....	152
6.1.2.12	Quellen des Bentonits.....	154
6.1.2.13	Auflösung und Ausfällung .....	155
6.1.2.14	Metallkorrosion .....	156
6.1.2.15	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen.....	158

6.1.2.16	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme .....	160
6.1.2.17	Auflockerungszone .....	161
6.1.2.18	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein .....	163
6.1.2.19	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung .....	165
6.1.2.20	Fluidvorkommen im Wirtsgestein .....	166
6.1.2.21	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein .....	168
6.1.2.22	Thermochemische Sulfatreduktion.....	169
6.1.2.23	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein .....	171
6.1.2.24	Zusammenfassung .....	172
6.1.3	Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes.....	175
6.1.4	Weniger wahrscheinliche FEP .....	176
6.1.4.1	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen .....	177
6.1.4.2	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses .....	180
6.1.4.3	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses .....	184
6.1.4.4	Kanalisation in Dichtelementen.....	187
6.1.4.5	Radionuklidmobilisierung und -transport für wahrscheinliche Aus- prägungen der weniger wahrscheinlichen FEP .....	189
6.1.4.6	Beschreibung der Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP .....	190
6.1.4.7	Zusammenfassende Darstellung .....	191
6.2	Alternativszenarien zur Einlagerungsvariante AB2.....	192
6.2.1	Alternative Betrachtung zu spezifischen Annahmen .....	193
6.2.1.1	Spezifische Annahme zur Klimaentwicklung .....	193
6.2.1.2	Spezifische Annahme zu Schacht- und Streckenverschlüssen .....	194
6.2.1.3	Spezifische Annahme zum Sicherheitsabstand .....	195
6.2.1.4	Spezifische Annahme zur Erkundungssohle .....	196
6.2.2	Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP.....	196
6.2.2.1	Erdbeben .....	196
6.2.2.2	Diapirismus.....	197
6.2.2.3	Subrosion .....	197
6.2.2.4	Bildung kryogener Klüfte.....	197

6.2.2.5	Glaziale Rinnenbildung .....	197
6.2.2.6	Versagen eines Brennelement-Behälters.....	197
6.2.2.7	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen .....	198
6.2.2.8	Konvergenz .....	198
6.2.2.9	Fluiddruck.....	199
6.2.2.10	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien .....	199
6.2.2.11	Lageverschiebung des Schachtverschlusses.....	199
6.2.2.12	Quellen des Bentonits.....	199
6.2.2.13	Auflösung und Ausfällung .....	200
6.2.2.14	Metallkorrosion .....	200
6.2.2.15	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen.....	200
6.2.2.16	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme .....	201
6.2.2.17	Auflockerungszone .....	201
6.2.2.18	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein.....	201
6.2.2.19	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung .....	202
6.2.2.20	Fluidvorkommen im Wirtsgestein .....	202
6.2.2.21	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein .....	202
6.2.2.22	Thermochemische Sulfatreduktion.....	203
6.2.2.23	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein .....	203
6.2.3	Radionuklidmobilisierung und -transport.....	203
6.2.4	Weniger wahrscheinliche FEP .....	204
6.2.4.1	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen .....	204
6.2.4.2	Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses .....	204
6.2.4.3	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses .....	205
6.2.4.4	Kanalisation in Dichtelementen.....	205
6.2.4.5	Zusammenfassung .....	205
6.3	Alternativszenarien zur Einlagerungsvariante AC .....	206
6.3.1	Alternative Betrachtung zu spezifischen Annahmen .....	207
6.3.1.1	Spezifische Annahme zur Klimaentwicklung .....	207
6.3.1.2	Spezifische Annahme zu Schacht- und Streckenverschlüssen .....	208
6.3.1.3	Spezifische Annahme zum Sicherheitsabstand .....	209
6.3.1.4	Spezifische Annahme zur Erkundungssohle .....	210

6.3.2	Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP .....	210
6.3.2.1	Erdbeben .....	211
6.3.2.2	Diapirismus .....	211
6.3.2.3	Subrosion .....	211
6.3.2.4	Bildung kryogener Klüfte .....	211
6.3.2.5	Glaziale Rinnenbildung .....	211
6.3.2.6	Versagen eines Brennelement-Behälters .....	212
6.3.2.7	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen .....	212
6.3.2.8	Konvergenz .....	213
6.3.2.9	Fluiddruck .....	213
6.3.2.10	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien .....	213
6.3.2.11	Lageverschiebung des Schachtverschlusses .....	213
6.3.2.12	Quellen des Bentonits .....	214
6.3.2.13	Auflösung und Ausfällung .....	214
6.3.2.14	Metallkorrosion .....	214
6.3.2.15	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen .....	214
6.3.2.16	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme .....	215
6.3.2.17	Auflockerungszone .....	215
6.3.2.18	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein .....	216
6.3.2.19	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung .....	216
6.3.2.20	Fluidvorkommen im Wirtsgestein .....	216
6.3.2.21	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein .....	217
6.3.2.22	Thermochemische Sulfatreduktion .....	217
6.3.2.23	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein .....	217
6.3.3	Radionuklidmobilisierung und -transport .....	217
6.3.4	Weniger wahrscheinliche FEP .....	218
6.3.4.1	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen .....	218
6.3.4.2	Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses .....	219
6.3.4.3	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses .....	219
6.3.4.4	Kanalisation in Dichtelementen .....	219
6.3.4.5	Zusammenfassung .....	220

<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>221</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>227</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>233</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>235</b>
	<b>Anhänge .....</b>	<b>239</b>



# 1 Einleitung

Der sichere Einschluss von radioaktiven Abfällen in einem Endlager ist im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises zu belegen. Dazu ist unter Einbeziehung der zeitlichen Veränderungen, die der Standort und das Endlagersystem im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre erfahren können, nachzuweisen, dass die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ eingehalten werden. Dabei stellen numerische Analysen mit der Berechnung von verschiedenen Indikatorwerten wichtige Elemente dar.

Voraussetzung für die Durchführung dieser numerischen Analysen sind Vorstellungen zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems. Diese werden beeinflusst durch die geologischen und klimatischen Entwicklungsmöglichkeiten am Standort und durch die von der Auslegung und Konzeption des Endlagers abhängigen Wirkungen dieser Entwicklungsmöglichkeiten sowie durch die eingelagerten Abfälle auf das Endlagersystem.

Die globalen, regionalen und lokalen geologischen und klimatischen Abläufe in der Vergangenheit können auf der Basis umfangreicher, zumeist empirischer Daten beschrieben und belegt werden. Darauf aufbauend ist das Verständnis des Zusammenhangs der langzeitlichen Prozesse und der sonstigen Einflussfaktoren, die die Entwicklung des Standortes Gorleben in der Vergangenheit bestimmt haben, entwickelt worden. Es ist davon auszugehen, dass dieselben Prozesse und Einflussfaktoren auch bei den zukünftigen geologischen und klimatischen Abläufen wirken. Als zusätzliche Einflussfaktoren kommen die Wirkungen hinzu, die durch die Errichtung des Endlagers und die Einlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund hervorgerufen werden.

In der Realität wird der Standort mitsamt einem Endlager zukünftig genau eine Entwicklung durchlaufen. Trotz der umfangreichen Kenntnisse der verschiedenen Einflussfaktoren kann diese tatsächliche Entwicklung des Endlagersystems für den Nachweiszeitraum nicht belastbar in allen Einzelaspekten und Details prognostiziert werden. So sind Zeitpunkte und Ausprägungen bestimmter zukünftiger Ereignisse am Standort Gorleben nicht eindeutig bestimmbar. Die daraus resultierende Ungewissheit bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems kann durch weitere Erkundungs- und Forschungsarbeiten nur in einem begrenzten Maße verringert werden.

Beispielsweise kann das Auftreten von Kaltzeiten mit Permafrostbildung am Standort Gorleben innerhalb der nächsten 1 Million Jahre als gesichert angesehen werden, aber

eine exakte Vorhersage, wann diese Kaltzeiten auftreten und bis in welche Gebiete der mit den Kaltzeiten einhergehende Vorstoß der Inlandeisgletscher aus dem Norden führt, ist nicht möglich. Aus der geologischen Vergangenheit können lediglich Bandbreiten für das zyklische Auftreten der Kaltzeiten sowie für deren mögliche Ausprägungen abgeleitet werden.

Aus diesem Grund wird gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) /MÖN 12/ auf Basis einer systematischen Analyse relevanter Einflussfaktoren eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder entworfen. Dies geschieht mit Hilfe einer Szenarienentwicklung, deren Ziel die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von Szenarien zu möglichen Entwicklungen des Endlagersystems ist, die für eine zuverlässige Beurteilung seiner Sicherheit nach dessen Stilllegung relevant sind. Besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, diejenigen Entwicklungsmöglichkeiten zu erfassen, bei denen es zu einem Zutritt von Lösungen zu den Abfallbehältern bzw. zu einer Mobilisierung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen kommen kann.

Im Vorhaben VSG wurde im Rahmen der Szenarienentwicklung eine Reihe von aus naturwissenschaftlicher Sicht plausiblen Entwicklungsmöglichkeiten für den Standort Gorleben zu den verschiedenen betrachteten Einlagerungsvarianten abgeleitet. Der vorliegende Bericht<sup>1</sup> beschreibt die Methodik der Szenarienentwicklung und die im Vorhaben VSG abgeleiteten Szenarien.

---

<sup>1</sup> Begleitend zum Bericht wurden Anhänge (Anhang A, B, C und D) erstellt, die in digitaler Form auf der beiliegenden CD vorliegen.

## 2 Begriffsbestimmungen

Zum besseren Verständnis der Ausführungen in diesem Bericht sind wichtige Begriffe für das Vorhaben VSG im Folgenden aufgeführt und erläutert:

Die auf ein Endlagersystem möglicherweise Einfluss nehmenden Faktoren werden mit dem englischen Akronym **FEP** bezeichnet. Das Akronym FEP steht für Features, Events und Processes (deutsch: Merkmale, Ereignisse und Prozesse).

Laut /BMU 10/ beschreibt ein **Szenarium** eine von den derzeitigen Standortgegebenheiten ausgehende und aufgrund geowissenschaftlicher oder sonstiger Überlegungen mehr oder weniger wahrscheinliche Entwicklung<sup>2</sup> des Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften nach der Stilllegung des Endlagers. Diese Entwicklung wird durch die Ausgangssituation sowie durch zukünftige Ereignisse und Prozesse bestimmt. Es können auch mehrere Entwicklungen zu einem Szenarium zusammengefasst werden.

Die im Vorhaben VSG abgeleiteten Szenarien stellen Abstraktionen zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems dar. Sie können nur einen bestimmten Zeitbereich oder nur einen Teil des Endlagersystems betreffen. Gemäß /MÖN 12/ soll die Gesamtheit der in der Szenarientwicklung abgeleiteten Szenarien die Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems abdecken.

Die **Szenarientwicklung** ist die systematische Herleitung und Beschreibung der Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers relevant sind. Dies geschieht auf der Grundlage eines FEP-Katalogs.

Das **Referenzszenarium** beschreibt eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender, möglicher Entwicklungen des Endlagersystems. Es ergibt sich un-

---

<sup>2</sup> In der Definition des Begriffs Szenarium in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ wird der Begriff Entwicklung verwendet. Um deutlich zwischen Entwicklungen, die in der Vergangenheit abgelaufen sind und eindeutig beschrieben werden können, und jenen, die für die Zukunft prognostiziert oder erwartet werden, unterscheiden zu können, wird in diesem Bericht für letztere stattdessen der Begriff Entwicklungsmöglichkeit verwendet werden.

ter vorher festgelegten Annahmen aus der Berücksichtigung der wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren und den FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Zugrunde gelegt wird die wahrscheinliche Ausprägung dieser FEP, die sich in der Regel aus den wahrscheinlichen Ausprägungen der kausal mit ihnen verbundenen wahrscheinlichen FEP ergibt.

Die **Ausprägung** sagt aus, in welcher Intensität das jeweilige FEP auftritt. Dabei kann es sich um eine qualitative Beschreibung oder um einen quantitativen Wert bzw. Wertebereich handeln. FEP können verschiedene Ausprägungen aufweisen, die als wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich bzw. unwahrscheinlich eingeordnet werden können oder die sich aus der jeweils betrachteten Systementwicklung ergeben. Es handelt sich bei der Ausprägung um bedingte Wahrscheinlichkeiten. Bedingt deshalb, da das FEP eintreten muss.

- Wenn dies für ein FEP möglich ist, sind im FEP-Katalog Ausprägungen in Verbindung mit Angaben zu ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit aufgeführt. Für das FEP *Konvergenz* sind beispielsweise Wertebereiche für die Kriechraten der unterschiedlichen Gebirgseinheiten angegeben, die als wahrscheinlich einzustufen sind, während höhere oder niedrigere Werte als weniger wahrscheinlich und sehr viel höhere oder niedrigere Werte als unwahrscheinlich anzusehen sind.
- Bei manchen FEP kann eine Ausprägung angegeben werden, eine Einordnung nach der Wahrscheinlichkeit ist aber nicht möglich. Dies hängt oft damit zusammen, dass die Datenlage für eine solche Einordnung nicht ausreicht. In diesen Fällen wird für das FEP im Referenzszenarium eine repräsentative Ausprägung angegeben. So wird beispielsweise im Referenzszenarium für das FEP *Erdbeben* das Bemessungserdbeben zugrunde gelegt.
- Bei manchen FEP hängt deren Ausprägung von der jeweils betrachteten Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems ab. Für solche FEP kann daher a priori keine wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche oder unwahrscheinliche Ausprägung identifiziert werden. Die Ausprägung solcher FEP und die Wahrscheinlichkeit dieser Ausprägung ergeben sich durch die Beeinflussung über andere, kausal mit ihnen verbundene FEP und muss unter den jeweiligen Bedingungen des Szenariums erst ermittelt werden. So wird z. B. die Ausprägung des FEP *Fluiddruck* unter anderem von der Metallkorrosion, von der Konvergenz der Grubenbaue und von der Zersetzung von Organika bestimmt. Die tatsächliche Ausprägung bei einer betrachteten

Systementwicklungsmöglichkeit kann vorab mittels Modellrechnungen oder durch Expertenurteil mit entsprechender Begründung abgeschätzt oder erst im Rahmen der Konsequenzenanalyse für das Szenarium ermittelt werden.

**Alternativszenarien** beschreiben weniger wahrscheinliche oder im Referenzszenarium nicht erfasste wahrscheinliche, mögliche Entwicklungen des Endlagersystems. Solche Entwicklungsmöglichkeiten können aus dem Auftreten eines weniger wahrscheinlichen FEP, der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines wahrscheinlichen FEP oder aus Alternativen zu den spezifischen Annahmen für das Referenzszenarium resultieren.

Ein **Rechenfall** ist eine modellmäßige numerische Abbildung eines Szenariums oder von dessen Teilaspekten mit definierten Parameterwerten, deren Bandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte.

Eine **Initial-Barriere** ist eine Barriere, deren mögliche Funktionsbeeinträchtigung durch Prozesse oder Ereignisse ein Ansatzpunkt für die Entwicklung von Szenarien ist. Die Initial-Barrieren bilden eine Teilmenge der im Endlagersystem wirksamen Barrieren, die – teilweise nur in bestimmten Zeitbereichen – über unterschiedliche Schutzfunktionen direkt oder indirekt zum sicheren Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich beitragen /MÖN 12/.

Die Auswahl der Initial-Barrieren erfolgt, um für die gewählte methodische Vorgehensweise zur Szenarientwicklung die Ansatzpunkte identifizieren zu können. In der VSG sind die Initial-Barrieren das Wirtsgestein, die Streckenverschlüsse, die Schachtverschlüsse sowie die Brennelement-Behälter. Diese Barrieren dienen dazu, den Kontakt von wässrigen Lösungen mit den eingelagerten Abfällen und die Freisetzung von volatilen Radionukliden zu verhindern, wobei ihre diesbezügliche Barrierenwirksamkeit zu Beginn der Nachverschlussphase vollständig entwickelt ist. Darin unterscheiden sich die Initial-Barrieren von den anderen Barrieren (z. B. Salzgrusversatz), die im Endlagersystem zu einem späteren Zeitpunkt wirksam werden.

Als **Initial-FEP** wird ein wahrscheinliches FEP mit einer direkten Beeinträchtigung der Funktion einer Initial-Barriere bezeichnet.

Einige Bezeichnungen von FEP für technische Komponenten beinhalten Aussagen zur Nichtfunktionalität der Komponente wie z. B. Ausfall eines sonstigen Endlagerbehäl-

ters, Versagen eines Brennelement-Behälters und Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses. Die Begriffe „**Ausfall**“, „**Versagen**“ und „**Vorzeitiges Versagen**“ haben dabei folgende Bedeutung:

- Von „Versagen“ ist bei technischen Barrieren die Rede, die eine Initial-Barriere darstellen, und ihre einschlusswirksame Funktion nicht (mehr) in vollem Umfang erfüllen.
- Ein „Vorzeitiges Versagen“ beschreibt das Verhalten von Initial-Barrieren, die die Anforderungen hinsichtlich ihrer Funktionsdauer nicht erfüllen.
- Von „Ausfall“ ist bei allen anderen technischen Komponenten im Endlagersystem die Rede, wenn sie eine ihnen zugeordnete Funktion nicht (mehr) erfüllen.

Die Beschreibung des Referenzszenariums erfolgt nach Teilsystemen, die wie folgt definiert sind:

- Das **Nahfeld** umfasst alle Einlagerungstrecken und Einlagerungsbohrlöcher mit allen darin enthaltenen Objekten und Materialien (Abfallgebände, Versatz und technische Einbauten, z. B. Bohrlochverrohrung) inklusive der Auflockerungszone.
- Mit **Strecken und Schächte** sind alle bergmännisch geschaffenen Hohlräume und Bohrungen mit allen darin enthaltenen Objekten und Materialien (z. B. Einbauten, Versatz, Verschlussbauwerke) inkl. Auflockerungszone gemeint, sofern sie nicht dem Nahfeld zuzuordnen sind.
- Das **Wirtsgestein** umfasst alle den Salzstock aufbauenden Gesteine zwischen der Salzstockbasis und dem Hutgestein abzüglich der bergmännisch geschaffenen Hohlräume und deren Auflockerungszonen.
- Die den Salzstock überlagernden und lateral an ihn angrenzenden Sedimente zzgl. dem Hutgestein bilden das **Deck- und Nebengebirge**.

### 3 Methodik der Szenarienentwicklung

Für das Vorhaben VSG wurde eine Vorgehensweise entwickelt, die es erlaubt, in systematischer Weise eine begrenzte Anzahl von plausiblen Szenarien zu entwickeln, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers relevant sind und mit denen der Ungewissheit bezüglich der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems Rechnung getragen wird, und diese Szenarien in eine Wahrscheinlichkeitsklasse einzustufen. Die Basis für die Ableitung der Szenarien bildet der FEP-Katalog /WOL 12a/, /WOL 12b/. Darin sind für jedes FEP u. a. seine möglichen Ausprägungen und die direkten Abhängigkeiten mit anderen FEP ausgewiesen und begründet, das heißt, es werden alle FEP genannt, auf die das jeweilige FEP direkt wirkt bzw. von denen es ausgelöst oder beeinflusst wird.

Das im Vorhaben VSG entwickelte Sicherheitskonzept /MÖN 12/ basiert auf einigen Leitgedanken. So soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden. Der Einschluss soll dabei sofort erfolgen und durch das Endlagersystem dauerhaft sichergestellt sein. Gewährleistet werden soll dies durch ein gestaffeltes Barrierensystem, dessen einzelne Elemente zum Teil diversitär und redundant wirken und die sich in ihrer zeitlichen Wirksamkeit ergänzen. Um die Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems umfassend abzubilden, setzt die Szenarienentwicklung an zwei Punkten an, die sich aus diesen Leitgedanken ergeben:

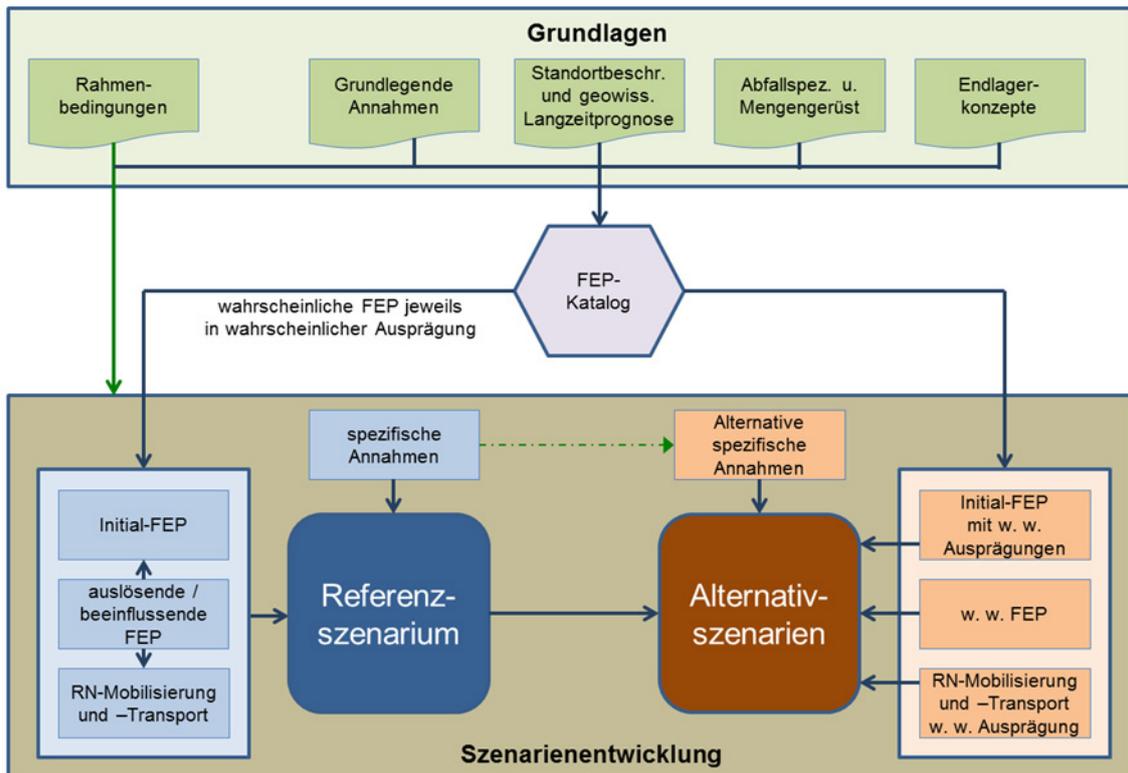
- Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein Kontakt von Lösungen mit den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird. Als erster Ansatzpunkt für die Ableitung von Szenarien dienen daher die FEP, die die Funktion der Initial-Barrieren direkt beeinträchtigen können (Initial-FEP).
- Neben den Barrieren, die einen Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindern sollen und deren Barrierenwirksamkeit bereits zu Beginn der Nachverschlussphase vollständig entwickelt ist, müssen die Entwicklungsmöglichkeiten betrachtet werden, die sich daraus ergeben, dass Radionuklide aus den Abfällen freigesetzt werden, ohne dass es zu einem Kontakt der Abfälle mit von außen zugetretenen Lösungen gekommen ist (z. B. durch die Feuchte im Salzgrusversatz, mögliche vorhandene Feuchte in Behältern). Der zweite Ansatzpunkt für die Szenarienent-

wicklung ist deshalb die Betrachtung der FEP, die die Radionuklidmobilisierung und -freisetzung sowie den Radionuklidtransport betreffen.

Neben den Initial-Barrieren tragen weitere Barrieren zum dauerhaften Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bei, indem sie zu einem späteren Zeitpunkt den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen (z. B. Salzgrusversatz) oder indem sie die Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich verhindern bzw. behindern (z. B. Salzgrusversatz und Abfallmatrix). So müssen die Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“ und „Streckenverschlüsse“ solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass die Sicherheitsanforderungen des BMU erfüllt sind /MÖN 12/. Die zeitlichen Veränderungen der Wirksamkeit dieser weiteren Barrieren sowie eine mögliche Beeinträchtigung ihrer Funktion durch im Endlagersystem ablaufende Prozesse werden durch entsprechende FEP und ihre Ausprägungen und Einwirkungen durch andere FEP berücksichtigt und im Rahmen der Szenarientwicklung erfasst.

Die Vorgehensweise zur Szenarientwicklung im Projekt VSG ist schematisch in Abb. 3.1 dargestellt. Sie ist unter Einbeziehung von Grundlagen und der engen Verknüpfung mit dem FEP-Katalog auf die Ableitung eines Referenzszenariums und davon abweichenden Alternativszenarien ausgerichtet.

Die folgenden Unterkapitel gehen auf die einzubeziehenden Grundlagen, den FEP-Katalog sowie den methodischen Ansatz zur Entwicklung eines Referenzszenariums und der Alternativszenarien ein. Darüber hinaus wird die methodische Vorgehensweise zur Einteilung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen dargestellt. Weiterhin werden Aspekte hinsichtlich der Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle aufgezeigt.



**Abb. 3.1** Schematische Darstellung der Elemente der Methodik zur Szenarientwicklung

(w. w. „weniger wahrscheinlich“, RN „Radionuklid“)

### 3.1 Grundlagen

Die Szenarientwicklung und der FEP-Katalog als ihr zentrales Element basieren auf einer Reihe von Grundlagen (Abb. 3.1), die entweder bereits zu Beginn des Projektes VSG vorlagen oder während des Projektablaufes erarbeitet worden sind. Im Folgenden wird auf diese Grundlagen einzeln eingegangen.

#### 3.1.1 Rahmenbedingungen

Zu den Rahmenbedingungen für die VSG und somit auch für die Szenarientwicklung zählen insbesondere die formulierten Anforderungen, Anweisungen und Handlungsoptionen aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Zum einen beeinflussen sie Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs, zum anderen ergeben sich aus ihnen auch direkte Vorgaben für die Methodik der Szenarientwicklung und deren Anwendung. Nachfolgend sind die wesentlichen Aspekte

der Sicherheitsanforderungen mit Bezug zur Szenarienentwicklung und zu den Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems benannt /BMU 10/:

- Es wird eine umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in eine der folgenden Wahrscheinlichkeitsklassen gefordert.
  - „Wahrscheinlich“ sind die für den Standort prognostizierten normalen Entwicklungsmöglichkeiten und für vergleichbare Standorte oder ähnliche geologische Situationen normalerweise beobachtete Entwicklungen. Dabei ist für die technischen Komponenten des Endlagers die als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften zugrunde zu legen.
  - „Weniger wahrscheinlich“ sind Entwicklungen, die für diesen Standort unter ungünstigen geologischen oder klimatischen Annahmen eintreten können und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen selten aufgetreten sind. Für die technischen Komponenten des Endlagers ist dabei eine als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften bei Eintreten der jeweiligen geologischen Entwicklung zugrunde zu legen. Außerdem sind auch von der normalen Entwicklung abweichende ungünstige Entwicklungsmöglichkeiten der Eigenschaften der technischen Komponenten zu untersuchen. Rückwirkungen auf das geologische Umfeld sind zu betrachten. Abgesehen von diesen Rückwirkungen sind dabei die jeweilig erwarteten geologischen Entwicklungen zu berücksichtigen. Innerhalb einer derartigen Entwicklungsmöglichkeit ist das gleichzeitige Auftreten mehrerer unabhängiger Fehler nicht zu unterstellen.
  - „Unwahrscheinlich“ sind Entwicklungen, deren Eintreten am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet wird und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen nicht beobachtet wurden. Zustände und Entwicklungen für technische Komponenten, die durch zu treffende Maßnahmen praktisch ausgeschlossen werden können, sowie das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten werden den unwahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten zugeordnet.
- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre sichergestellt ist.

- Hinsichtlich wahrscheinlicher und weniger wahrscheinlicher Entwicklungen ist zu zeigen, dass die radiologischen Bewertungskriterien (Absatz 6.2 und 6.3 in /BMU 10/) eingehalten werden.
- Unwahrscheinliche Entwicklungen werden gemäß der Methodik nicht durch Szenarien beschrieben.

In Kapitel 3.4 wird die Vorgehensweise für die Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen dargestellt.

### **3.1.2 Grundlegende Annahmen**

Bei der Durchführung von Sicherheitsanalysen ist es in vielen Fällen unumgänglich, Vorgaben und Festlegungen zu treffen sowie von bestimmten Voraussetzungen auszugehen, die im Weiteren kurz als Annahmen bezeichnet werden. Bei den Annahmen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die einen übergeordneten, grundlegenden Charakter haben und solchen, die aus spezifischen methodischen Vorgehensweisen resultieren (Kapitel 5.1.2).

Da die Erkundung des Standortes Gorleben nicht abgeschlossen ist, bestehen Ungewissheiten in Bezug auf die Standortdaten und die modellhafte Vorstellung zum Standort, die nicht im Verlauf des Projektes VSG durch ein gezieltes FuE-Programm reduziert oder beseitigt werden konnten. Daher wurde für die Durchführung des Projektes VSG eine Reihe von grundlegenden Annahmen getroffen:

- Die laterale Ausbildung des Salzstockes Gorleben entspricht dem geologischen Schnitt von Bornemann /BGR 03/ und die Übertragbarkeit dieses Schnittes auf den Teufenbereich der Einlagerungssohle ist gegeben.
- Die Übertragbarkeit der für die Salzgesteine im Erkundungsbereich 1 (EB1) und im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle ermittelten Gesteinseigenschaften auf die Salzgesteine im gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den ggf. außerhalb liegenden Teilen der Einlagerungssohle ist gegeben.
- Das Hauptsalz der Staßfurt-Folge weist eine ausreichende Mächtigkeit für die Aufnahme der Einlagerungsbereiche für alle Endlagerkonzepte auf. Dabei ist der festgelegte Sicherheitsabstand zu den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Gesteinschichten zu berücksichtigen.

Neben diesen Annahmen bezüglich der Ausdehnung und Struktur des Salzstocks Gorleben gilt für die Ableitung von Szenarien, dass – solange die Integrität des Teils der geologischen Barriere, die zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich gehört, gewährleistet ist – ausgeschlossen werden kann, dass sich in ihr Wegsamkeiten für den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen oder für den Transport von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen zwischen dem Grubengebäude und der Biosphäre bilden /MÖN 12/. Für die wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems ist gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nachzuweisen. Die Beschreibung der wahrscheinlichen Szenarien basiert zunächst auf der Annahme, dass die Integrität der geologischen Barriere gegeben ist, das heißt, dass sich in ihr keine Wegsamkeiten ausbilden. Der notwendige Nachweis, dass diese Annahme tatsächlich gerechtfertigt war, muss dann jedoch noch geführt werden und erfolgt im Rahmen der systemanalytischen Bewertungen<sup>3</sup>.

### **3.1.3 Standortbeschreibung und geowissenschaftliche Langzeitprognose**

Weitere Grundlagen für die Szenarientwicklung im Rahmen der VSG bilden die Standortbeschreibung /KÖT 03/, /KÖT 07/, /BOR 08/ und die geowissenschaftliche Langzeitprognose /MRU 11/. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose beschreibt die erwartete langzeitliche Entwicklung des Standortes ohne Betrachtung des Endlagers und der dadurch verursachten Störung. Sie ist im Zusammenhang mit wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU für die Nachweisführung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über den Nachweiszeitraum heranzuziehen.

Die Standortbeschreibung und die geowissenschaftliche Langzeitprognose sind zudem eine Grundlage des FEP-Kataloges und liefern für die Szenarientwicklung darüber hinaus Hinweise auf die Ausgangssituation und die erwartete Entwicklung derjenigen geologischen Bereiche, die vom Endlager und dem eingebrachten Abfall unberührt bleiben.

---

<sup>3</sup> Im Falle, dass der Integritätsnachweis nicht erbracht werden kann, sind die Sicherheitsanforderungen nicht erfüllt. Dann ist das Endlagerkonzept und/oder die Standortwahl zu prüfen. Im Anschluss an eine Änderung des Endlagerkonzeptes ist die Szenarientwicklung in ihrer Gesamtheit zu wiederholen.

### **3.1.4 Abfallspezifikation und Mengengerüst**

Art und Menge der einzulagernden Abfälle sowie deren Charakterisierung hinsichtlich ihrer radiologischen und stofflichen Eigenschaften /PEI 11/ sind eine wesentliche Grundlage für die Planung von Endlagerkonzepten, den FEP-Katalog, die Szenarientwicklung und die numerischen Systemanalysen.

Angaben zum Radionuklidinventar der Abfälle und zur stofflichen Zusammensetzung der Abfälle und Abfallbehälter sind u. a. von Bedeutung, um die Ausprägungen bestimmter ablaufender Prozesse zu bestimmen und damit mögliche Entwicklungen z. B. hinsichtlich der Einflussnahme auf das geochemische Milieu im Nahfeld bei einer Radionuklidmobilisierung abzuleiten.

### **3.1.5 Endlagerkonzepte**

Die Endlagerkonzepte /BOL 11/, /BOL 12/ sind für die Szenarientwicklung eine wesentliche Grundlage, da je nach konzeptioneller Ausgestaltung unterschiedliche Entwicklungsmöglichkeiten bzw. Szenarien auftreten können. Grundlegendes Merkmal der vorliegenden Endlagerkonzepte ist die räumliche Trennung und Abschottung der wärmeentwickelnden Abfälle und der radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in unterschiedlichen Bereichen im Hauptsalz z2HS.

Die in der VSG betrachteten Varianten für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle /BOL 11/, /BOL 12/ sind:

- Variante A) Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern
- Variante B1) Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in selbstabschirmenden Endlagerbehältern (POLLUX- und CASTOR-Behälter) in horizontalen Strecken
- Variante B2) Einlagerung aller wärmeentwickelnden Abfälle in Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern (Differenzbetrachtung zu B1)
- Variante C) Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs)

Für die Szenarientwicklung wurden aus den o. g. Varianten die Varianten A und B1 zur Einlagerungsvariante AB1, aus den Varianten A und B2 zur Einlagerungsvariante AB2 sowie aus den Varianten A und C zur Einlagerungsvariante AC zusammengefasst. Je nach Einlagerungsvariante können sich unterschiedliche Entwicklungsmöglichkeiten für das Endlagersystem ergeben.

Die Szenarientwicklung wurde für jede einzubeziehende Einlagerungsvariante durchgeführt. Die Planungsarbeiten zu den Einlagerungsvarianten lieferten dafür wesentliche Informationen, z. B. zum Aufbau des Grubengebäudes, zur Anordnung und Lage von Einlagerungsbereichen und Einlagerungsfeldern, zur Position, Zusammensetzung und Beschaffenheit von Abschlussbauwerken wie Schacht- und Streckenverschlüssen und zur Einbringung von Versatz- und Verfüllbaustoffen. Darüber hinaus waren die stofflichen Charakterisierungen und konstruktiven Eigenschaften der Endlagerbehälter für die Einordnung von möglichen Umsetzungsprozessen bei Kontakt mit Lösungen eine wesentliche Datengrundlage.

### **3.2 FEP-Katalog**

Der FEP-Katalog /WOL 12a/, /WOL 12b/ nimmt im Rahmen der Methodik zur Szenarientwicklung eine zentrale Stellung ein. Er übernimmt die Funktion eines Verbindungselementes zwischen den Grundlagen und der Szenarientwicklung. Aufbau und Inhalt des FEP-Kataloges orientieren sich an der Methodik zur Szenarientwicklung und ermöglichen, die für die Szenarien relevanten FEP direkt aus dem Katalog zu selektieren. Das gilt jeweils für das Referenzszenarium und für die Alternativszenarien.

Neben der ausführlichen Beschreibung der FEP hinsichtlich allgemeiner Informationen, Sachlage am Endlagerstandort und standortspezifischer Auswirkungen beinhaltet der Katalog Angaben zur bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit<sup>4</sup> sowie Angabe und Begründung zur möglichen Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren. Darüber hinaus werden Angaben zur direkten Abhängigkeit von anderen FEP sowie zur Handhabung in den verschiedenen Teilsystemen des Endlagersystems („Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ sowie „Deck- und Nebengebirge“) gemacht. Die

---

<sup>4</sup> Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit kennzeichnet diejenige Wahrscheinlichkeit, mit der ein FEP unter der Bedingung eintritt, dass die für sein Eintreten notwendigen Voraussetzungen am Standort vorliegen bzw. mit Sicherheit zu erwarten sind /WOL 12a/.

direkten Abhängigkeiten werden in Form von auslösenden, beeinflussenden, resultierenden und beeinflussten FEP benannt und begründet. Aus den Angaben des FEP-Kataloges lassen sich darüber hinaus Hinweise zur Ausprägung einzelner FEP entnehmen.

### **3.3 Szenarien**

Zu den drei Einlagerungsvarianten wurden je ein Referenzszenarium sowie Alternativszenarien entwickelt. Im vorliegenden Bericht stellt die Einlagerungsvariante AB1 für die Betrachtung und Ableitung von Szenarien der anderen Einlagerungsvarianten (AB2 und AC) die Bezugsgrundlage dar. Bei der Ableitung eines Referenzszenariums und der Alternativszenarien der Einlagerungsvarianten AC und AB2 wurden daher die sich ergebenden Unterschiede zur Einlagerungsvariante AB1 identifiziert und in der Beschreibung der Szenarien in diesem Bericht dokumentiert. In den folgenden Unterkapiteln werden die methodischen Schritte zur Entwicklung der entsprechenden Szenarien aufgezeigt und beschrieben.

#### **3.3.1 Ableitung eines Referenzszenariums**

Für die Ableitung des Referenzszenariums sind folgende Aspekte von Bedeutung, die auch in der Definition des Referenzszenariums (Kapitel 2) angesprochen werden:

- Das Referenzszenarium beinhaltet nicht eine einzelne Entwicklungsmöglichkeit, sondern beschreibt eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems.
- Das Referenzszenarium folgt aus der
  - Berücksichtigung von vorher festgelegten Annahmen, zu denen die in Kapitel 3.1.2 genannten grundlegenden Annahmen sowie spezifische Annahmen (Kapitel 5.1.2) für das Referenzszenarium gehören, und der
  - Berücksichtigung wahrscheinlicher FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren (Initial-FEP) und der FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen.

- Zugrunde gelegt wird die wahrscheinliche Ausprägung dieser FEP. Sie ist entweder im FEP-Katalog dokumentiert, bzw. wird der im FEP-Katalog angegebenen, repräsentativen Ausprägung gleichgesetzt, oder sie ergibt sich aus dem Einfluss der auf das FEP wirkenden wahrscheinlichen FEP, wobei jeweils deren wahrscheinliche Ausprägung unterstellt wird.

Ein wichtiges Element der Szenarienentwicklung stellen die für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen dar. Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen stellen dann einen Ausgangspunkt für die Ableitung von Alternativszenarien dar. Die Notwendigkeit, spezifische Annahmen aufzustellen, ergibt sich aus unterschiedlichen Gründen. So weisen die Befunde bzw. Kenntnisse zu bestimmten Sachverhalten, Gegebenheiten und Umständen Ungewissheiten auf, die sich in manchen Fällen nur schwer bzw., wie z. B. bei der zukünftigen Klimaentwicklung, überhaupt nicht ausräumen lassen. In anderen Fällen ist z. B. der Nachweis über die Erstellbarkeit und Funktionalität von Abschlussbauwerken oder anderen Endlagerkomponenten noch nicht erbracht. Trotz vorhandenen Ungewissheiten und noch nicht geschlossenen Kenntnislücken sind die mit ihnen verbundenen Aspekte in den Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen. Dies geschieht durch die Aufstellung von plausiblen spezifischen Annahmen (Kapitel 5.1.2).

In den unterschiedlichen Bereichen des Endlagersystems können die FEP in verschiedener Ausprägung relevant sein. Um die Ausprägung der FEP differenzieren zu können, werden die vier Teilsysteme des Endlagersystems „Nahfeld“, „Wirtsgestein“, „Strecken und Schächte“ sowie „Deck- und Nebengebirge“ betrachtet (Kapitel 2 bzw. /WOL 12b/).

### **3.3.1.1 Initial-FEP mit wahrscheinlichen Ausprägungen**

Die Initial-FEP sind bereits bei der Erstellung des FEP-Kataloges identifiziert worden und können direkt aus dem FEP-Katalog entnommen werden. In Tab. 3.1 sind die Initial-FEP beispielhaft für die Einlagerungsvariante AB1 zusammengestellt.

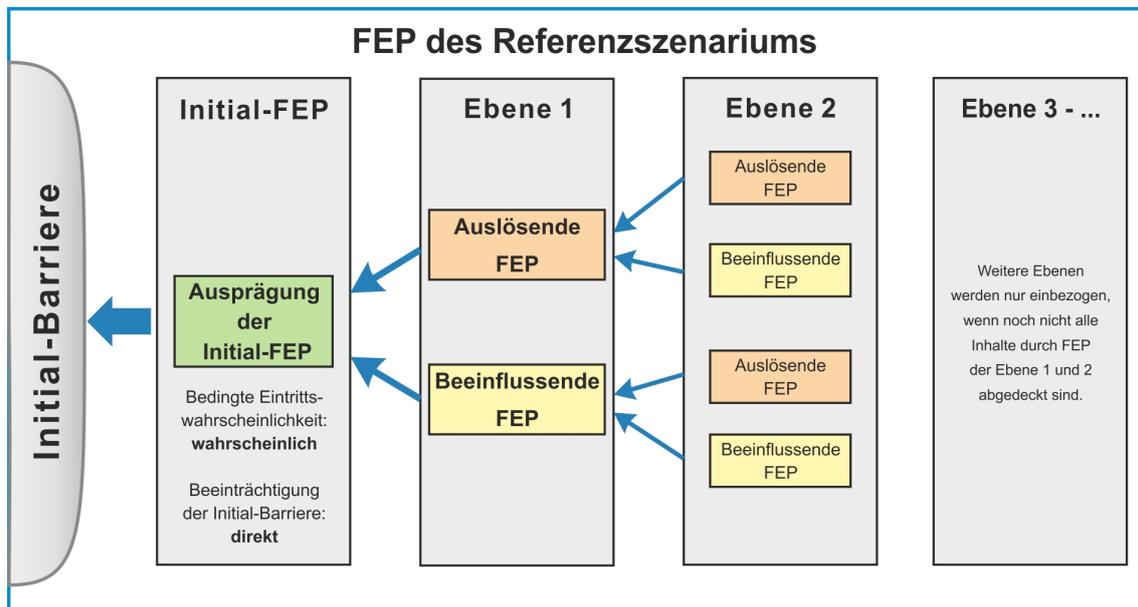
**Tab. 3.1** Initial-FEP für die Einlagerungsvariante AB1

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

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

Hinsichtlich der Ableitung der Ausprägung aller zu betrachtenden FEP, die nicht a priori eine Ausprägung aufweisen, sind alle einwirkenden FEP heranzuziehen und zu diskutieren. Unter einwirkenden FEP werden solche verstanden, die gemäß FEP-Katalog entweder auslösend oder beeinflussend auf das jeweilige, zu betrachtende FEP wirken (Abb. 3.2). Bei der Ableitung der Ausprägung der Initial-FEP müssen aus methodischen Gründen beim Referenzszenarium, bei dem es sich um eine wahrscheinliche

Entwicklungsmöglichkeit handelt, alle im FEP-Katalog aufgeführten wahrscheinlichen FEP, die in mindestens einem Teilsystem wirken, berücksichtigt werden.



**Abb. 3.2** Schematische Darstellung der einzubeziehenden Abhängigkeiten zur Bestimmung der Ausprägung von Initial-FEP

Bei der Ableitung der Ausprägung werden zunächst die einwirkenden FEP der 1. und 2. Ebene berücksichtigt (siehe auch Anhang A). Anschließend ist zu prüfen, ob wahrscheinliche und in mindestens einem Teilsystem zu berücksichtigende FEP im FEP-Katalog existieren, die bei der Bestimmung der Ausprägung eines Initial-FEP nicht erfasst worden sind. Ist dies der Fall, sind weitere Ebenen für die Ableitung der Ausprägungen der Initial-FEP einzubeziehen. Bei dieser Überprüfung können diejenigen FEP unberücksichtigt bleiben, die sich auf die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport beziehen, da sie über den zweiten Ansatzpunkt bei der Entwicklung von Szenarien berücksichtigt werden (Kapitel 3.3.1.2).

Die Verknüpfung der einzubeziehenden FEP ist im FEP-Katalog recherchierbar. Die FEP der 1. Ebene sind dabei direkt den Einträgen unter den Initial-FEP im FEP-Katalog zu entnehmen. Folgt man den FEP der 1. Ebene im FEP-Katalog, so erhält man sukzessive die FEP der 2. Ebene. Die Vorgehensweise für möglicherweise weitere einzubeziehende Ebenen ist analog.

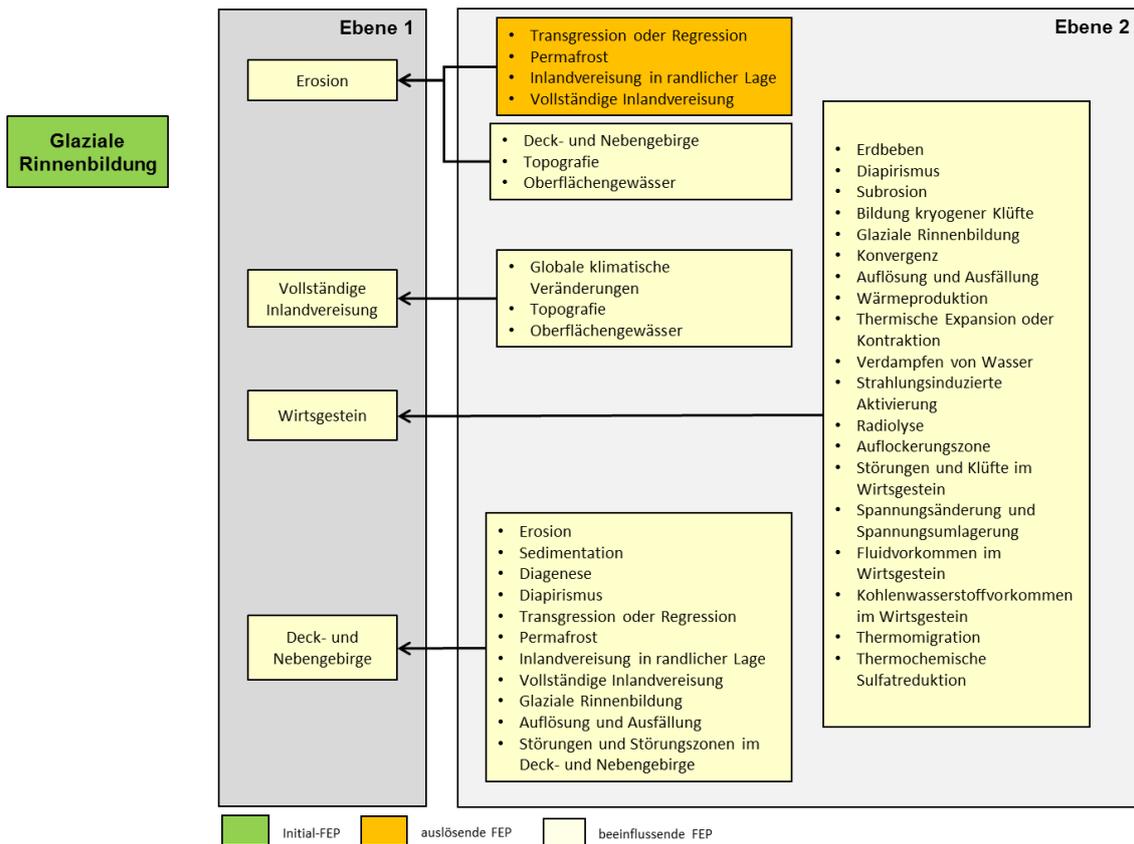
Unter Berücksichtigung der genannten Abhängigkeiten und Ausprägungen der FEP der 1. und 2. Ebene und ggf. weiterer Ebenen wird die wahrscheinliche Ausprägung der

Initial-FEP abgeleitet. Eine Einschätzung hinsichtlich der Ausprägung aller einzubeziehenden FEP gemäß dieser Vorgehensweise ist im Anhang A für das Referenzszenarium dargestellt. Für einige FEP, z. B. den *Fluiddruck*, ist die Ausprägung erst durch weiterführende Untersuchungen ableitbar.

Die Abb. 3.3 soll anhand des Initial-FEP *Glaziale Rinnenbildung* den erläuterten Zusammenhang der FEP der 1. und 2. Ebene sowie der Ausprägung verdeutlichen. Aus der schematischen Darstellung ist zu ersehen, dass auf das Initial-FEP *Glaziale Rinnenbildung* vier direkt beeinflussende FEP und kein auslösendes FEP wirken (Ebene 1). Diese Abhängigkeiten sind im FEP-Katalog unter dem FEP *Glaziale Rinnenbildung* aufgeführt und erläutert. Folgt man nun den vier beeinflussenden FEP im FEP-Katalog, dann hat jedes FEP wiederum beeinflussende FEP und im Fall des FEP *Erosion* auch auslösende FEP (Ebene 2). Diese Abhängigkeiten sind unter dem jeweiligen FEP (z. B. *Erosion*) im FEP-Katalog aufgeführt und erläutert. Hinsichtlich der Diskussion zur Ausprägung sind dann die dargestellten Einflüsse einzubeziehen. Diese Diskussion wird für jedes Initial-FEP im Anhang A vorgenommen. Eine schematische Darstellung (analog zur Abb. 3.3) hinsichtlich der Einfluss nehmenden FEP (1. und 2. Ebene) auf die Initial-FEP enthält der Anhang C.

Am Beispiel des Zusammenhanges *Glaziale Rinnenbildung* (Initial-FEP), *Erosion* (beeinflussendes FEP der 1. Ebene) und *Vollständige Inlandvereisung* (auslösendes FEP der 2. Ebene) soll die Diskussion erläutert werden. In Folge einer Erosion des Untergrundes entstehen glaziale Rinnen. Das Ausmaß der Rinnenbildungen ist von der Festigkeit des Gesteins abhängig. Mit einer vollständigen Inlandvereisung ist großräumige flächenhafte und linienhafte Erosion verbunden. Die vollständige Inlandvereisung ist neben anderen Ereignissen die Voraussetzung für das Wirken der Erosion in bestimmten Abschnitten des Nachweiszeitraumes. Hinsichtlich der Erosion liegen noch weitere auslösende FEP wie z. B. *Transgression und Regression* vor, die jedoch für die Diskussion der Entstehung einer glazialen Rinne keine Rolle spielen.

Die im FEP-Katalog als weniger wahrscheinlich und nicht zu betrachten eingestuft FEP sind nicht Bestandteil des Referenzszenariums und werden bei der Beschreibung der Ausprägung nicht berücksichtigt.



**Abb. 3.3** Schematische Darstellung der einzubeziehenden Abhängigkeiten am Beispiel des Initial-FEP *Glaziale Rinnenbildung*

### 3.3.1.2 Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport

Neben den Entwicklungsmöglichkeiten der Initial-Barrieren sind Entwicklungen, die zu einer Radionuklidmobilisierung und zu einem möglicherweise anschließenden Transport von Radionukliden im Endlagersystem führen können, zu betrachten, da sie für die Nachweisführung der Einhaltung geforderter radiologischer Kriterien essenziell sind (vgl. hierzu Kapitel 3.1.1 oder /BMU 10/).

Hinsichtlich Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport sind die jeweils möglichen auslösenden und beeinflussenden FEP im FEP-Katalog angegeben und deren Wirkungen zu betrachten. Die Ableitung der Ausprägungen dieser FEP erfolgt in analoger Weise wie für die Initial-FEP in Kapitel 3.3.1.1 beschrieben.

### **3.3.2 Ableitung von Alternativszenarien**

Neben der Ableitung eines Referenzszenariums wird durch die o. g. Methodik die Ableitung von Alternativszenarien ermöglicht. Alternativszenarien können prinzipiell sowohl weniger wahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeiten als auch im Referenzszenarium nicht erfasste wahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeiten beschreiben.

Ausgangspunkte für die Ableitung von Alternativszenarien sind:

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

In den folgenden vier Unterkapiteln werden die verschiedenen Wege zur Entwicklung von Alternativszenarien im Detail beschrieben. Es ist durchaus denkbar, dass sich bei der Ableitung der Alternativszenarien von den vier verschiedenen Ausgangspunkten qualitativ vergleichbare Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems ergeben, die

- bereits durch andere Alternativszenarien repräsentiert werden oder
- sich nur in der Ausprägung einiger weniger FEP unterscheiden.

In diesem Fall können u. U. die unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten in einem repräsentativen Alternativszenarium zusammengefasst und dargestellt werden. Dabei müssen die jeweiligen Unterschiede in den Ausprägungen in abdeckender Weise im repräsentativen Alternativszenarium berücksichtigt werden.

#### **3.3.2.1 Alternativen zu spezifischen Annahmen**

Durch Berücksichtigung von Alternativen zu den spezifischen Annahmen für das Referenzszenarium können Alternativszenarien resultieren, z. B. wenn unterstellt wird, dass

eine für das Referenzszenarium getroffene spezifische Annahme nicht gilt oder durch eine andersartige Annahme ersetzt wird. Die für die Alternative möglicherweise resultierenden Alternativszenarien sind dann jeweils unter fachlicher Einschätzung in einem Abwägungsprozess in die Wahrscheinlichkeitsklassen „wahrscheinlich“ oder „weniger wahrscheinlich“ einzuordnen (vgl. hierzu auch Kapitel 3.4).

Im Gegensatz zu den unter Einbeziehung anderer Ausgangspunkte abzuleitenden Alternativszenarien (Kapitel 3.3.2.2, 3.3.2.3 und 3.3.2.4) kann u. U. bei dieser Art von Alternativszenarien die alternative Betrachtung keinen direkten Bezug zu einem FEP des FEP-Kataloges aufweisen.

Die Alternative kann je nach Formulierung der spezifischen Annahme für das Referenzszenarium eine quantitative Angabe einer physikalischen Größe oder eine qualitative Einschätzung erfordern. In jedem Fall ist die Sinnfälligkeit der Angabe zu hinterfragen und zu begründen. Im Weiteren ist zu prüfen, ob die alternative Annahme durch ein nicht im Referenzszenarium berücksichtigtes FEP repräsentiert wird und inwieweit FEP des FEP-Kataloges unmittelbar betroffen sind.

Abschließend werden potenzielle Unterschiede zum Referenzszenarium, die sich aus der alternativen Betrachtung der spezifischen Annahme ergeben, identifiziert und geprüft, ob diese Unterschiede nicht schon durch andere Alternativszenarien repräsentiert werden. Ist dies nicht der Fall wird ein entsprechendes Alternativszenarium formuliert.

Wenn sich aus der Alternative zu einer spezifischen Annahme nach fachlicher Einschätzung ein wahrscheinliches Alternativszenarium ergibt, hat das zur Folge, dass neben diesem Szenarium weitere Alternativszenarien zu betrachten sind. Diese können sich – analog zur Vorgehensweise beim Referenzszenarium – aus der Kombination mit weniger wahrscheinlichen FEP oder der Kombination mit wahrscheinlichen FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen ergeben.

### **3.3.2.2 Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen**

Bei diesem Ausgangspunkt zur Ableitung von Alternativszenarien sind die zu betrachtenden FEP durch die Initial-FEP des Referenzszenariums vorgegeben. Die Aufgabe besteht darin, zu den Initial-FEP weniger wahrscheinliche Ausprägungen zu identifizieren und zu dokumentieren.

Dazu werden die Initial-FEP (Tab. 3.1) einzeln betrachtet. Für diese FEP werden jeweils die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen festgelegt und davon abhängig wird beschrieben, welche Abweichungen vom Referenzszenarium sich durch diese Ausprägungen ergeben können. Sollten sich keine Abweichungen ergeben, so ergibt sich aus der Betrachtung dieses FEP kein Alternativszenarium. Für den Fall, dass sich Abweichungen vom Referenzszenarium ergeben, werden die möglichen Auswirkungen auf die resultierenden und beeinflussten FEP beschrieben und die Konsequenzen für das Endlagersystem qualitativ beschrieben. Jedes auf diese Weise abgeleitete Alternativszenarium ist aufgrund der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines Initial-FEP als weniger wahrscheinlich einzustufen (Kapitel 3.4).

Prinzipiell ergibt sich aus jedem FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen, die nicht vom Referenzszenarium abgedeckt sind, eine zusätzliche abweichende Systementwicklung. Allerdings können mehrere FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen ähnliche Auswirkungen auf die beeinflussten FEP haben oder die Auswirkungen entsprechen denjenigen eines weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Auswirkung auf eine Initial-Barriere. In diesem Fall können die entsprechenden abweichenden Entwicklungsmöglichkeiten durch andere Alternativszenarien beschrieben oder zu einem repräsentativen Alternativszenarium zusammengefasst werden.

### **3.3.2.3 Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport**

In Analogie zum Referenzszenarium werden nicht nur für die Initial-FEP Ausprägungen abgeleitet, sondern auch für die FEP, die die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport beschreiben. An Hand der entsprechenden auslösenden und beeinflussenden FEP wird überprüft, ob weniger wahrscheinliche Systementwicklungen identifiziert werden können, die noch nicht durch die bereits abgeleiteten Alternativszenarien repräsentiert werden.

Resultierende Alternativszenarien aus dieser Betrachtung sind aufgrund der zugrunde zu legenden weniger wahrscheinlichen Ausprägung als weniger wahrscheinlich einzustufen (Kapitel 3.4).

### 3.3.2.4 Weniger wahrscheinliche FEP

Hinsichtlich der aus den weniger wahrscheinlichen FEP resultierenden Alternativszenarien kann wiederum auf die Angaben im FEP-Katalog zurückgegriffen werden. Die weniger wahrscheinlichen FEP sind dort ausgewiesen und können entsprechend selektiert werden. Es gibt vier weniger wahrscheinliche FEP, die eine direkte Beeinträchtigung einer Initial-Barriere aufweisen (Tab. 3.2).

Für die weitere Betrachtung wird untersucht, in wie weit die Berücksichtigung eines weniger wahrscheinlichen FEP das Referenzszenarium beeinflusst bzw. verändert. Hierzu wird aus der Liste der weniger wahrscheinlichen FEP jeweils eines ausgewählt und die aus dem FEP resultierenden bzw. beeinflussten FEP betrachtet, um die Auswirkungen auf die Systementwicklung zu identifizieren. Jedes auf diese Weise abgeleitete Alternativszenarium ist als weniger wahrscheinlich einzustufen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das weniger wahrscheinliche FEP eine wahrscheinliche Ausprägung aufzuweisen hat. Die Verknüpfung eines weniger wahrscheinlichen FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung wird nicht untersucht, da eine derartige Kombination dem Bereich der unwahrscheinlichen Entwicklung zuzuordnen ist (Kapitel 3.4).

**Tab. 3.2** Weniger wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte Initial-Barrieren *
1.5.03.01	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	WG
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

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

### 3.3.3 Kennzeichnung der Szenarien

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurden für die drei zu betrachtenden Einlagerungsvarianten jeweils ein Referenzszenarium und verschiedene Alternativszenarien abgeleitet.

Zur besseren Orientierung und Einordnung der daraus möglicherweise entstehenden Vielfalt an Szenarien werden alle für das Vorhaben VSG abgeleiteten Szenarien alphanumerisch eindeutig gekennzeichnet. Das zugrunde liegende Kennzeichnungsschema ist der Tab. 3.3 zu entnehmen.

Nach der Tab. 3.3 ist z. B. das Szenarium mit der Kennzeichnung R3 das Referenzszenarium zur Einlagerungsvariante AC. Ein Szenarium mit der Kennzeichnung A1i5 ist ein Alternativszenarium zur Einlagerungsvariante AB1, das über den Ausgangspunkt Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung abgeleitet wurde und das die laufende Nummer 5 hat.

**Tab. 3.3** Kennzeichnung der Szenarien

Kennzeichnung	Szenarium	i	Einlagerungsvariante	x	Ausgangspunkt *	lfd. Nr. j
Ri	Referenzszenarium (R)	1	AB1			
		2	AB2			
		3	AC			
Aixj	Alternativszenarium (A)	1, 2 oder 3	AB1, AB2 oder AC	a	Alternative zu einer spez. Annahme	1 ... n <sub>a</sub>
				i	Initial-FEP und w. w. Ausprägung	1 ... n <sub>i</sub>
				m	RN-Mobilisierung und RN-Transport mit w. w. Ausprägung	1 ... n <sub>m</sub>
				w	w. w. FEP mit w. w. Ausprägung	1 ... n <sub>w</sub>

\* (w. „wahrscheinlich“, w. w. „weniger wahrscheinlich“, RN „Radionuklid“)

### 3.4 Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ unterscheiden nach wahrscheinlichen, weniger wahrscheinlichen und unwahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten, für die verschiedene Bewertungskriterien gelten. Aus diesem Grund müssen die Szenarien in entsprechende Wahrscheinlichkeitsklassen eingeordnet (vgl. hierzu Kapitel 3.1.1) werden. Diese Einordnung erfolgt systematisch auf Basis der Angaben zu den bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der FEP, die im FEP-Katalog /WOL 12b/ aufgeführt sind, und ihren jeweiligen Ausprägungen, die im FEP-Katalog dokumentiert sind oder sich aus den Einwirkungen durch auslösende und beeinflussende FEP ergeben. In diesem Bericht werden nur wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien beschrieben, so dass die Unterscheidung nach unwahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten entfällt.

Für die Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen werden zunächst die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten aller FEP, die ein Szenarium bestimmen, herangezogen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit jedes FEP wurde nach Einschätzung der bei der Erstellung des FEP-Kataloges beteiligten Institutionen bestimmt und die Begründung für diese Einschätzung im FEP-Katalog dokumentiert. Diese Angabe ist aber nicht hinreichend, denn es ist noch die Angabe der Wahrscheinlichkeit der Ausprägung der FEP erforderlich<sup>5</sup>.

Das folgende Beispiel soll die Bedeutung der Ausprägung eines FEP verdeutlichen: In der Vergangenheit sind im gesamten norddeutschen Raum glaziale Rinnen in Verbindung mit Kaltzeiten mit Gletschervorstoß gebildet worden. Das FEP *Glaziale Rinnenbildung* ist für die Standortregion innerhalb einer aus der Vergangenheit abgeleiteten Bandbreite der Ausprägung über den Nachweiszeitraum wahrscheinlich. Eine glaziale Rinnenbildung, die von dieser wahrscheinlichen Bandbreite der Ausprägung abweicht, ist als weniger wahrscheinlich einzuschätzen. Eine Abweichung, die nach wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht zu erwarten ist, ist unwahrscheinlich. Derartige unwahrscheinliche Ausprägungen werden in der Szenarienentwicklung nicht betrachtet.

---

<sup>5</sup> Bei dieser Angabe handelt es sich um eine bedingte Wahrscheinlichkeit mit der Bedingung, dass das FEP eintritt (nur bei weniger wahrscheinlichen FEP von Bedeutung).

Die Ausprägung ist bestimmt durch die auf ein entsprechendes FEP Bezug nehmenden auslösenden und beeinflussenden FEP (1. Ebene) und wiederum deren auslösende und beeinflussende FEP (2. Ebene) und ggf. weitere Ebenen (vgl. hierzu Kapitel 3.3.1, Abb. 3.2 sowie die Anhänge A und B).

Für die weitere Betrachtung sind bezogen auf ein FEP nur Kombinationen aus

- wahrscheinlichem FEP in seiner wahrscheinlichen Ausprägung,
- wahrscheinlichem FEP in seiner weniger wahrscheinlichen Ausprägung sowie
- weniger wahrscheinlichem FEP in seiner wahrscheinlichen Ausprägung

relevant. Alle anderen Kombinationen eines FEP führen zu unwahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten, die im Rahmen der Szenarienentwicklung nicht weiter zu betrachten sind. Gleiches gilt für die Betrachtung von mehreren FEP die in Bezug auf Eintreten oder Ausprägung weniger wahrscheinlich sind. Die Voraussetzung hierbei ist, dass diese FEP stochastisch unabhängig sind. Unter Einhaltung der genannten Voraussetzung gilt der Multiplikationssatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Der Multiplikationssatz sagt aus, dass die Wahrscheinlichkeit des Durchschnitts von (k) Ereignissen (hier mehrere FEP), die wechselseitig voneinander unabhängig sind, gleich dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten dieser Ereignisse ist /SAC 97/, /ZÖF 88/.

$$p(E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_k) = p(E_1) \times p(E_2) \times \dots \times p(E_k) \quad (3.1)$$

Am Beispiel von zwei Ereignissen bedeutet wechselseitig voneinander unabhängig, dass das Ereignis  $E_1$  nicht das Ereignis  $E_2$  beeinflusst und umgekehrt. Der Durchschnitt zweier Ereignisse  $E_1$  und  $E_2$  (mathematische Schreibweise  $E_1 \cap E_2$ ) ist definiert als das Ergebnis, das eintritt, wenn sowohl  $E_1$  als auch  $E_2$  eintritt /ZÖF 88/.

Für die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen FEP werden die gleichen quantitativen Einschätzungen zugrunde gelegt, wie sie für die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ gelten. Darin wird ausgesagt, dass

- eine wahrscheinliche Entwicklung (wE) vorliegt, wenn die quantifizierbare Wahrscheinlichkeit im Nachweiszeitraum mindestens 10 % ( $0,1 \leq p_{wE} \leq 1$ ) beträgt und

- eine weniger wahrscheinliche Entwicklung (wwE) vorliegt, wenn die quantifizierbare Wahrscheinlichkeit im Nachweiszeitraum mindestens 1 % ( $0,01 \leq p_{\text{wwE}} < 0,1$ ) beträgt.

Daraus wird abgeleitet, dass eine unwahrscheinliche Entwicklung (uE) bei einer Wahrscheinlichkeit kleiner als 1 % ( $0 \leq p_{\text{uE}} < 0,01$ ) vorliegt.

Übertragen auf zwei voneinander unabhängige weniger wahrscheinliche FEP z. B. *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* (FEP<sub>1</sub>) und *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* (FEP<sub>2</sub>) bedeutet das, dass der Durchschnitt nach dem Multiplikationssatz  $p(\text{FEP}_1 \cap \text{FEP}_2) < 0,01$  ( $< 1\%$ ) ist, für  $0,01 \leq p(\text{FEP}_1) < 0,1$  und  $0,01 \leq p(\text{FEP}_2) < 0,1$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass das FEP<sub>1</sub> und das FEP<sub>2</sub> eintreten, ist demnach kleiner 1 % und somit unwahrscheinlich. Für alle FEP, bei denen entweder das Eintreten oder die Ausprägung weniger wahrscheinlich sind, gilt die Zuordnung  $0,01 \leq p(\text{FEP}) < 0,1$ . Daraus folgt, dass jedes resultierende Alternativszenarium unter Einbeziehung von zwei oder mehreren weniger wahrscheinlichen FEP in Bezug auf Eintreten oder Ausprägung und unter der o. g. Voraussetzung (wechselseitig voneinander unabhängig) unwahrscheinlich ist. Aus diesem Grund wird bei den Alternativszenarien immer nur ein Aspekt (Eintreten des FEP oder Ausprägung) verändert.

Anhand von zur Verfügung stehenden Informationen über Eintrittswahrscheinlichkeiten und Wahrscheinlichkeiten der Ausprägungen der bestimmenden FEP von Szenarien lässt sich eine Zuordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen vornehmen. Die Abb. 3.4 zeigt für die zu betrachtenden Szenarien die entsprechenden möglichen Wahrscheinlichkeitsklassen. Die Alternativszenarien, die sich durch Alternativen zu den spezifischen Annahmen für das Referenzszenarium ergeben, nehmen eine Sonderstellung ein, auf die hinsichtlich der Einordnung in mögliche Wahrscheinlichkeitsklassen am Schluss des Kapitels separat eingegangen wird.

Bestimmend für die Einordnung des Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse ist das FEP mit der geringsten Wahrscheinlichkeit hinsichtlich bedingtem Eintreten und Ausprägung. Das Referenzszenarium setzt sich ausschließlich aus wahrscheinlichen FEP in ihren wahrscheinlichen Ausprägungen zusammen. Da in den Alternativszenarien gegenüber dem Referenzszenarium immer nur ein Aspekt (Eintreten des FEP oder Ausprägung) hinsichtlich wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich verändert wird, ist eine relativ unkomplizierte Einordnung der Szenarien in die Wahrscheinlichkeitsklassen möglich. Im Folgenden wird dieser Sachverhalt näher erläutert:

Nach der beschriebenen Methodik zur Ableitung des Referenzszenariums (Kapitel 3.3.1) folgt das Referenzszenarium aus den Initial-FEP und den FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Die Ausprägungen der einzubeziehenden FEP sind im FEP-Katalog dokumentiert oder werden durch wahrscheinliche Ausprägungen der einwirkenden wahrscheinlichen FEP (auslösende und beeinflussende FEP) bestimmt. Das heißt, alle bestimmenden FEP des Referenzszenariums sind hinsichtlich ihres Eintretens und ihrer Ausprägung wahrscheinlich. Nach obigem Ansatz, dass das FEP mit der geringsten Wahrscheinlichkeit hinsichtlich bedingtem Eintreten und Ausprägung ausschlaggebend ist, folgt, dass das Referenzszenarium in die Wahrscheinlichkeitsklasse „wahrscheinlich“ eingeordnet wird.

FEP (Initial-FEP, Radionuklid-Mobilisierung und Radionuklid-Transport sowie weniger wahrscheinliche FEP)				Mögliche Wahrscheinlichkeitsklassen der Szenarien		Szenarien
bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit		Ausprägung				
Einschätzung aus FEP-Katalog		Einschätzung unter Berücksichtigung von FEP Abhängigkeiten (s. Anhang A bzw. B)		wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	
wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich			
X		X		X		Referenzszenarium
X			X		X	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen
	X	X			X	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP
Einschätzung aus der jeweiligen Betrachtung der diskutierten Abweichung von der Annahme				X	X	Alternativszenarien aus alternativer Betrachtung von spezifischen Annahmen

**Abb. 3.4** Darstellung der möglichen Wahrscheinlichkeitsklassen (gelbe Markierung) der unterschiedlichen Szenarien

Die Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP bzw. der FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport (Kapitel 3.3.2.2 und 3.3.2.3) sind so aufgebaut, dass jeweils immer nur eines dieser FEP hinsichtlich einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung betrachtet wird. Die anderen FEP des Referenzszenariums bleiben unverändert, solange keine Beeinflussung ihrer Ausprägungen durch das veränderte FEP resultiert. Aufgrund der betrachteten weniger wahrscheinlichen Ausprägung sind Alternativszenarien, die auf diesem Wege abgeleitet werden, in die Wahrscheinlichkeitsklasse „weniger wahrscheinlich“ einzuordnen.

Bei den Alternativszenarien, die weniger wahrscheinliche FEP berücksichtigen (Kapitel 3.3.2.4), wird wiederum als Grundlage das Referenzszenarium herangezogen und jeweils um ein weniger wahrscheinliches FEP ergänzt. Dabei wird jeweils die wahrscheinliche Ausprägung dieses weniger wahrscheinlichen FEP betrachtet. Das heißt, alle das Alternativszenarium bestimmenden FEP haben eine wahrscheinliche Ausprägung und sind auch hinsichtlich ihres Eintretens, bis auf das ergänzte weniger wahrscheinliche FEP, wahrscheinlich. Damit sind Alternativszenarien, die auf diesem Wege abgeleitet werden, in die Wahrscheinlichkeitsklasse „weniger wahrscheinlich“ einzuordnen.

Die verbleibenden Alternativszenarien beziehen sich auf die Betrachtung von Alternativen zu den spezifischen Annahmen des Referenzszenariums (Kapitel 3.3.2.1). Diese Alternativszenarien weichen hinsichtlich der obigen Darstellung zur Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen ab. Der Grund hierfür ist, dass die spezifische Annahme kein FEP darstellt, das hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausprägung nach dem vorgestellten Ansatz charakterisiert werden kann. Die Einschätzung, ob es sich um wahrscheinliche oder weniger wahrscheinliche Alternativen handelt, die dann ggf. zur Ableitung von Alternativszenarien führen, ist zu begründen.

Resultierende Alternativszenarien aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen können je nach fachlicher Begründung sowohl in die Wahrscheinlichkeitsklasse „wahrscheinlich“ als auch „weniger wahrscheinlich“ eingeordnet werden.

### **3.5 Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle**

Die Szenarien bilden die Grundlage für die quantitativen Modellrechnungen u. a. zur Integritätsanalyse oder zur radiologischen Konsequenzenanalyse. Aufgrund der komplexen, nicht-linearen Systemabläufe mit einer Vielzahl von Einflussfaktoren werden die quantitativen Modellrechnungen als numerische Simulationen mit aufwändigen Computerprogrammen, im Folgenden vereinfachend als Rechenprogramme bezeichnet, durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellrechnungen stellen ein wichtiges Element für die Bewertung der Auswirkungen der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase dar.

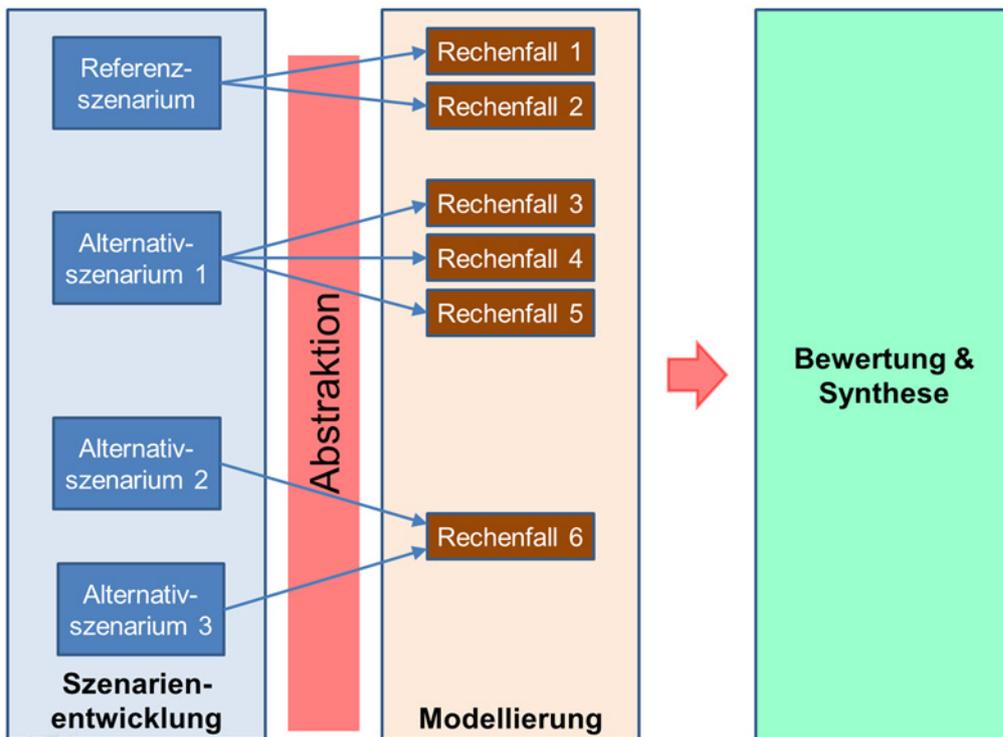
Zur Durchführung der Modellrechnungen werden Rechenfälle definiert, die jeweils modellmäßige Abstraktionen der Szenarien mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte

darstellen. Die modellmäßige Abstraktion der Szenarien erfolgt, weil in der Regel die beschriebenen Szenarien nicht direkt mit einem Rechenprogramm abgebildet und ausgewertet werden können. Dies kann seine Ursache darin haben, dass sich einzelne Prozesse modelltechnisch nicht oder nur eingeschränkt abbilden lassen, z. B. weil der Prozess sehr komplex ist und die notwendigen Rechenprogramme, Werkzeuge oder Daten für eine Modellierung im notwendigen Detaillierungsgrad nicht zur Verfügung stehen oder weil das Verständnis zu dem Prozess weniger gut ausgebildet ist und somit die Prozessbeschreibung Ungewissheiten aufweist.

Zur numerischen Analyse der einzelnen Szenarien werden im Regelfall mehrere Rechenfälle definiert. Zum einen ist dies darauf zurückzuführen, dass sich die Vielzahl der zu betrachtenden Prozesse in einem Szenarium oft nicht vollständig mit nur einem Rechenprogramm abbilden bzw. behandeln lässt. Zum anderen hängt von der für ein Szenarium zu bewertenden sicherheitlichen Fragestellung (z. B. Integritätsanalyse, radiologische Langzeitaussage) ab, welche Rechenprogramme einzusetzen sind. Umgekehrt ist vorstellbar, dass ein abdeckend definierter Rechenfall dazu geeignet ist, die Auswirkungen von zwei oder mehr Szenarien zu bewerten. In jedem Fall ist die Anwendbarkeit der Rechenfälle für die jeweiligen Szenarien aufzuzeigen, und sicherzustellen, dass die für ein Szenarium definierten Rechenfälle in ihrer Gesamtheit eine umfassende Bewertung aller sicherheitlichen Fragestellungen zulassen.

Die Abb. 3.5 zeigt schematisch die Stationen und Elemente von der Entwicklung der Szenarien, über ihre Abstraktion in Rechenfälle sowie die Modellierung und analytische Auswertung. Die Gesamtwürdigung aller Ergebnisse der Modellrechnungen erfolgt dann im Synthesebericht.

Die Definition von Rechenfällen ist zwar nicht Teil der Szenarientwicklung, jedoch sollte für eine adäquate Abstraktion der Szenarien in den Rechenfällen eine fachliche Schnittstelle zwischen Szenarientwicklung und Modellierung vorgesehen werden.



**Abb. 3.5** Schematische Darstellung von der Entwicklung von Szenarien bis zur rechentechnischen Auswertung und Synthese der Ergebnisse

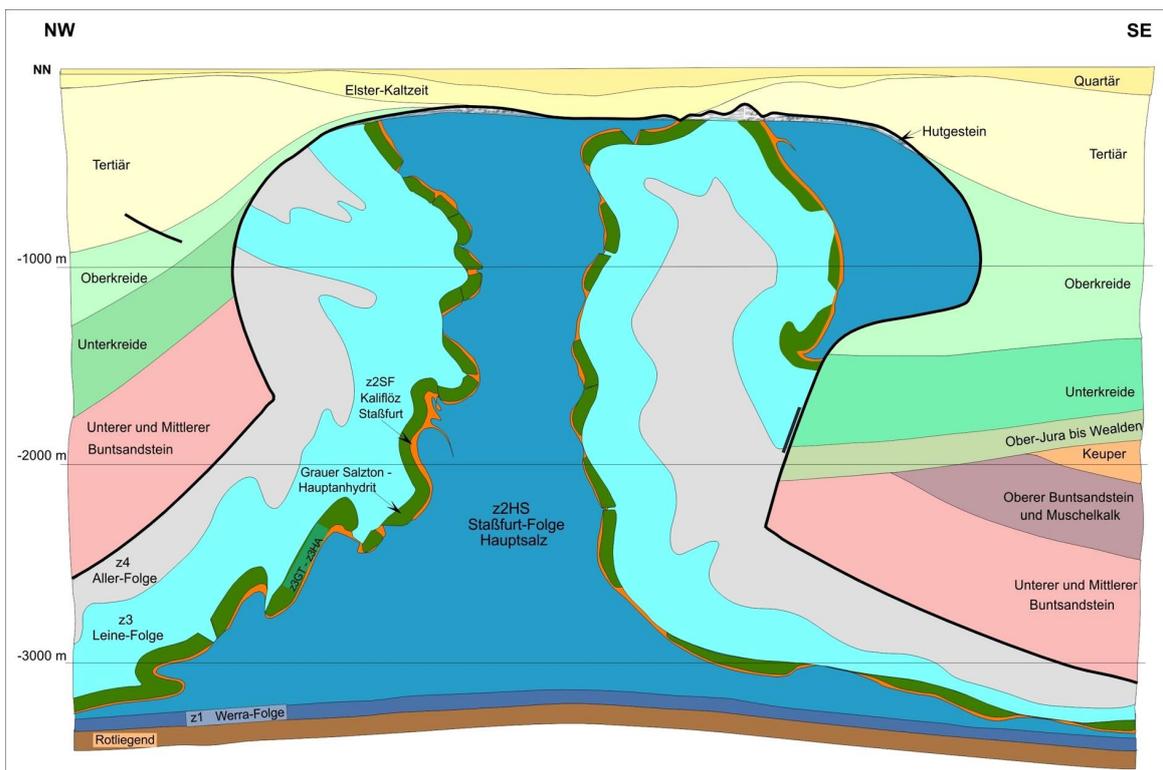
## 4 Ausgangssituation

### 4.1 Geologie

Der Salzstock Gorleben weist eine Länge von 14 km und eine maximale Breite von 4 km auf. Die Salzstockbasis befindet sich in einer Tiefe von ca. 3.500 m u. NN, während der Salzspiegel unterhalb des einige 10er Meter mächtigen Hutgesteins in einer Tiefe von 250 bis 320 m u. NN ausgebildet ist. Flankiert wird er von der nördlichen und südlichen Randsenke, die durch die Abwanderung der Zechsteinsalze beim Salzstockaufstieg entstanden sind. In den Senken kamen mesozoische Sedimente und des Tertiärs zur Ablagerung. Über dem Salzstock streichen die jüngsten mesozoischen Schichten (Oberkreide) aus, so dass das Deckgebirge hauptsächlich aus grundwasserführenden quartären und tertiären Sanden und Kiesen sowie Schluffen und Tonen besteht. Sie bauen ein System aus Grundwasserleitern und -geringleitern auf, das eine Gliederung in ein oberes und ein unteres Stockwerk aufweist. Die Lagerungsverhältnisse der quartären Schichten wurden vor allem durch kaltzeitliche Prozesse geprägt, die auch zur Bildung der elsterzeitlichen Gorlebener Rinne als wichtigem Strukturelement des Deckgebirges führten. Sie verläuft in nordost-südwestlicher Richtung und erreicht eine Tiefe von ca. 300 m u. NN. Über dem Salzstock Gorleben ist die Rinne in einer Tiefe von 100 m u. NN zwischen 2 und 4 km breit und hat auf einer Fläche von 7,5 km<sup>2</sup> Kontakt zum Hutgestein sowie lokal begrenzt auch zum Salinar. Die Rinnenfüllung ist aus elsterzeitlichen Schmelzwassersanden und Geschiebemergeln zusammengesetzt, die von Sedimenten des Lauenburger-Ton-Komplexes überlagert werden. Darüber folgen in unterschiedlichen Mächtigkeiten abgelagerte überwiegend tonige Sedimente der Holstein-Warmzeit und der jüngeren Kaltzeiten.

Die Schichtabfolge des Zechstein im Umfeld des Salzstocks Gorleben beginnt im Liegenden mit der Werra-Folge (z1), es folgen die Staßfurt- (z2) sowie die Leine-Folge (z3), den Abschluss bildet im Hangenden die Aller-Folge (z4). Während die Werra-Folge neben Anhydriten, Salztonen und Karbonaten im Liegenden auch noch Dolomite, Konglomerate, Sandsteine und Kupferschiefer aufweist, zeigen die Folgen z2 bis z4 jeweils eine Abfolge, die im Liegenden mit Salztonen beginnt und von Karbonaten abgelöst wird. Darüber folgen Salinargesteine, die als Anhydrit, Steinsalz und Kalisalz ausgebildet sind und vor allem im z3 in Wechselfolgen vorliegen.

Im Zuge des Salzstockaufstiegs wurden die zuvor shlig lagernden Schichten des z2 und z3-z4 stark verfaultet. Entlang der Längsachse des Diapirs verläuft ein Hauptsattel, in dessen Zentrum die älteren Salinargesteine der Staßfurt-Folge anstehen (Abb. 4.1). Zu beiden Seiten folgen vom älteren zum Jüngeren die ebenfalls aufgestiegenen und verfaulteten Schichten der Leine- und Aller-Folge. Die intensive Faltung führte zur Ausdünnung von Schichten im Bereich der Faltenschenkel und zur Verdickung im Achsenbereich. Vor allem bei den Anhydritschichten bildeten sich dabei Boudinage-Strukturen aus.



**Abb. 4.1** Schematischer Querschnitt durch den Salzstock Gorleben (basierend auf /BOR 91/ geändert in /ISI 08/)

Im zentralen Teil des Sattels, der im Salzstock Gorleben ausgebildet ist, steht das Hauptsalz (z2HS) der Staßfurt-Folge an, das vom Liegenden zum Hangenden aus den Formationen Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) und Kristallbrockensalz (z2HS3) besteht. Darüber folgen das Hangendsalz (z2HG), die kieseritischen Übergangsschichten (z2UE), das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) sowie Decksteinsalz (z2DS) und gebänderter Deckanhydrit (z2DA). Bisher wurde das Basissalz (z2BS), das die älteste Schicht der Salzabfolge in der Staßfurt-Folge darstellt, im Zentralsattel nicht sicher nachgewiesen. Geochemische Analysen der Salzgesteine der Staßfurt-Folge ergaben

nach /BOR 08/, dass der Anteil der Nebengemengeteile vom Liegenden zum Hangenden abnimmt. Während der Anhydritgehalt im Knäuelsalz im Mittel noch ca. 4 bis 8 Gew.-% beträgt, liegt er in den kieseritischen Übergangsschichten nur noch bei 2 Gew.-%. Für einzelne, lokal eng begrenzte Teilbereiche des Knäuelsalzes wird angegeben, dass die anhydritischen Einschaltungen 10 % bis 20 % betragen können. Die Verteilung des Anhydrits ist in den Schichten inhomogen in Form von Linienresten, Knäueln und teilweise in Streifen ausgebildet.

Das Hauptsalz (vor allem das Knäuelsalz) enthält unregelmäßig verteilt flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe. In den jüngeren Schichten kommen vor allem in der Leine-Folge zahlreiche Anhydritlagen vor. Die mächtigste davon ist die Hauptanhydrit-Gruppe (z3HA). Wichtig ist außerdem die anhydritische Gorleben-Bank (z3OSM). Das vereinzelte Vorkommen von Klüften und wässrigen Lösungen ist zumeist an Anhydrite gebunden.

## **4.2 Einlagerungsvarianten**

In Kapitel 3.1.5 wurde bereits auf die Bedeutung des Endlagerkonzeptes und der im Vorhaben VSG betrachteten Einlagerungsvarianten für die Szenarienentwicklung eingegangen. In allen Einlagerungsvarianten werden die radioaktiven Abfälle, unterschieden nach Abfallströmen und ihren wärmeentwickelnden Eigenschaften, in getrennten Bereichen im Salzstock ausgehend von einer Einlagerungssohle, die ca. 30 m unterhalb der Erkundungssohle (840 m Teufe) errichtet werden soll, eingelagert.

In den Varianten B1, B2 und C sind überwiegend Brennelemente und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ostflügel des Endlagers einzubringen. Das schließt die verpressten Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung (nur Varianten B1 und C) sowie die CSD-C und CSD-B ein, die hinsichtlich der Wärmeentwicklung vernachlässigbar sind.

Sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sind für den Westflügel des Endlagers in der Variante A vorgesehen. Die Variante A stellt eine Option dar, anhand derer im Vorhaben VSG untersucht werden soll, ob eine gemeinsame Endlagerung unterschiedlicher Arten radioaktiver Abfälle technisch machbar bzw. sinnvoll ist.

Für die Varianten (B1, B2 und C) liegen Planungsgrundlagen vor, die alle anfallenden radioaktiven Abfälle in Bezug auf Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle berücksichtigen. Dies ist unabhängig davon, ob die Variante A einbezogen wird. Bei der Variante B2 fallen keine verpressten Strukturteile und damit keine separaten Behälter für diese Abfälle an, da die Brennelemente ohne entsprechende Konditionierung in die vorgesehenen Behälter verpackt werden.

Entsprechend den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ werden die Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde Abfälle so ausgelegt, dass sie in der Betriebsphase rückholbar und bis zu 500 Jahre nach Verschluss handhabbar sind. Brennelement-Behälter müssen zudem für 500 Jahre eine Freisetzung von Aerosolen verhindern.

Die Verschlüsse müssen gemäß dem Sicherheitskonzept einen Lösungszutritt vermeiden bzw. begrenzen, bis der Salzgrus soweit kompaktiert ist, dass er den Einschluss übernehmen kann. Der erforderliche Zeitraum für diese Salzgruskompaktion wird nach konservativen Abschätzungen auf wenige 1000 Jahre eingeschätzt<sup>6</sup>. Um diesen Zeitraum abzudecken, wird ein deutlich längerer Zeitraum für die Funktionsdauer der Verschlussbauwerke aufgrund folgender Überlegung angesetzt. Nach /MÜL 12a/ sind die Schacht- und Streckenverschlüsse u. a. für die heutigen möglichen Einwirkungen aufgrund der mechanischen sowie hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse ausgelegt. Grundlegende Änderungen dieser Verhältnisse, die die Funktion der Schacht- und Streckenverschlüsse nachhaltig beeinträchtigen können, sind erst bei einer Kaltzeit zu erwarten. Am Standort Gorleben können entsprechend des z. B. in /FOR 99/ prognostizierten Klimaverlaufs in ca. 10.000 Jahren kaltzeitliche Verhältnisse entsprechend einer Weichsel-Kaltzeit beginnen. Diese würden ab ca. 50.000 Jahren ihr Maximum erreichen. Die geänderten hydrogeologischen Bedingungen im Deckgebirge und damit auch die Randbedingungen für die Auslegung der Schachtelemente sind dann nicht mehr prognostizierbar. Aussagen über die Funktion der Schachtverschlüsse sind daher nur für einen Zeitraum von ca. 50.000 Jahre möglich und dieser Zeitraum wird als Funktionsdauer bei den Nachweisen unterstellt.

---

<sup>6</sup> Der FEP-Katalog /WOL 12b/ weist auf folgendes Ergebnis hin: „Simulationsrechnungen mit dem ZHANG-Modell unter Verwendung des Parametersatzes für trockenen Salzgrus dokumentieren, dass der Salzgrus unter den am Standort Gorleben vorherrschenden Randbedingungen innerhalb eines Zeitraumes von weniger als 1000 Jahren eine Porosität in der Größenordnung von  $1\pm 1\%$  erreicht (Popp et al., 2011).“

Die technischen Barrieren sollen mit Beginn der Nachverschlussphase ihre Dichtfunktion erfüllen. Daher sind die heutigen Randbedingungen (Geologie/Hydrogeologie) für die Auslegung maßgebend. Bei der Auslegung der Schachtverschlüsse wurde entsprechend der heutigen hydrogeologisch/hydrochemischen Situation eine Bandbreite von Süß- bis Salzwässern zugrunde gelegt, die plausible Entwicklungsmöglichkeiten innerhalb der vorgesehenen Funktionsdauer abdecken. Dies schließt auch die Folgen einer Meeresüberflutung ein, die aufgrund einer Klimaerwärmung nicht auszuschließen ist.

Die Auslegung unterstellt dabei bis zur nächsten Kaltzeit keine Ereignisse, die zu wesentlichen Abweichungen von den heutigen Spannungsverhältnissen im Gebirge führen. Die Auflast einer zusätzlichen Wassersäule im Fall einer Meeresüberflutung ist berücksichtigt.

Es wird erwartet, dass diese Auslegung auch die maximale geomechanische Belastung des Endlagersystems durch sich entwickelnde thermomechanische Spannungen infolge des Wärmeeintrags durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle abdeckt. Dies ist in der Integritätsanalyse zu zeigen.

Für die Auslegung der (geo)technischen Barrieren gegen Erdbeben werden die Anforderungen der KTA zugrunde gelegt. Darauf basierend wurde ein Bemessungserdbeben von 7,3 MSK ermittelt, das sowohl alle tektonischen Erdbeben als auch die natürlichen Einsturzbeben im Standortbereich abdeckt /WOL 12b/.

Die hydraulische Auslegung berücksichtigt für die Schächte einen hydrostatischen Druck mit einer zusätzlichen Wassersäule infolge einer Meeresüberflutung.

Die Auslegung der Streckenverschlüsse berücksichtigt einen Fluiddruck, der im Grubengebäude unter Berücksichtigung von Lösungszutritten über den Schacht und aus dem Wirtsgestein auf Basis einer abgeschätzten maximalen Größe des Reservoirs sowie der Komprimierung der eingeschlossenen Grubenluft und einer Gasbildung auftreten kann.

Die Verschlussbauwerke sind als (geo)technische Barrieren diversitär (Schachtverschlüsse) und redundant (Streckenverschlüsse) ausgelegt. Der Schachtverschluss besteht aus drei diversitären Dichtelementen, deren Integrität einzeln nachgewiesen wird. Jeder Streckenverschluss verfügt über jeweils zwei Dichtelemente, die konzepti-

onell redundant sind. Durch diese Maßnahmen wird die Möglichkeit für ein vorzeitiges Versagen eines Verschlussbauwerks verringert.

Weiterhin gehört zum Verfüll- und Verschlusskonzept, dass die Auffahrungen mit Versatzmaterial verfüllt und die Schächte, die Einlagerungssohle und Erkundungssohle mit Abdichtbauwerken verschlossen werden. Die Tab. 4.1 zeigt für die Varianten B1, C und A die benötigten Versatzmaterialien und Versatzmengen für die entsprechenden Auffahrungen des Grubengebäudes. Für die Variante B2 liegen keine Angaben aus der Grubengebäudeplanung vor.

**Tab. 4.1** Übersicht über die in den Einlagerungsvarianten benötigten Versatzmengen /BOL 12/

Grubengebäudeteil		Versatzmaterial	Versatzmengen [m³] je Einlagerungsvariante		
			B1	C	A
Einlagerungssohle	Einlagerungsstrecken und Querschläge	Salzgrus, trocken	585.000	384.000	120.000
	Richtstrecken	Salzgrus, feucht	210.000	123.000	36.000
	Infrastrukturbereich	Schotter	230.000	230.000	-
Erkundungssohle	Infrastrukturbereich	Schotter	110.000	110.000	-
	Richtstrecken und Querschläge	Salzgrus, feucht	365.000		

Die betrachteten Einlagerungsvarianten stellen Kombinationen der einzelnen Varianten B1, B2 und C mit der Variante A dar. Gemeinsam ist allen Einlagerungsvarianten, dass eine Kombination mit der Variante A zu betrachten ist. Die Variante A ist in allen kombinierten Einlagerungsvarianten unverändert. Im Folgenden werden die wesentlichen konzeptionellen Planungen zu den Einlagerungsvarianten erläutert.

#### 4.2.1 Einlagerungsvariante AB1

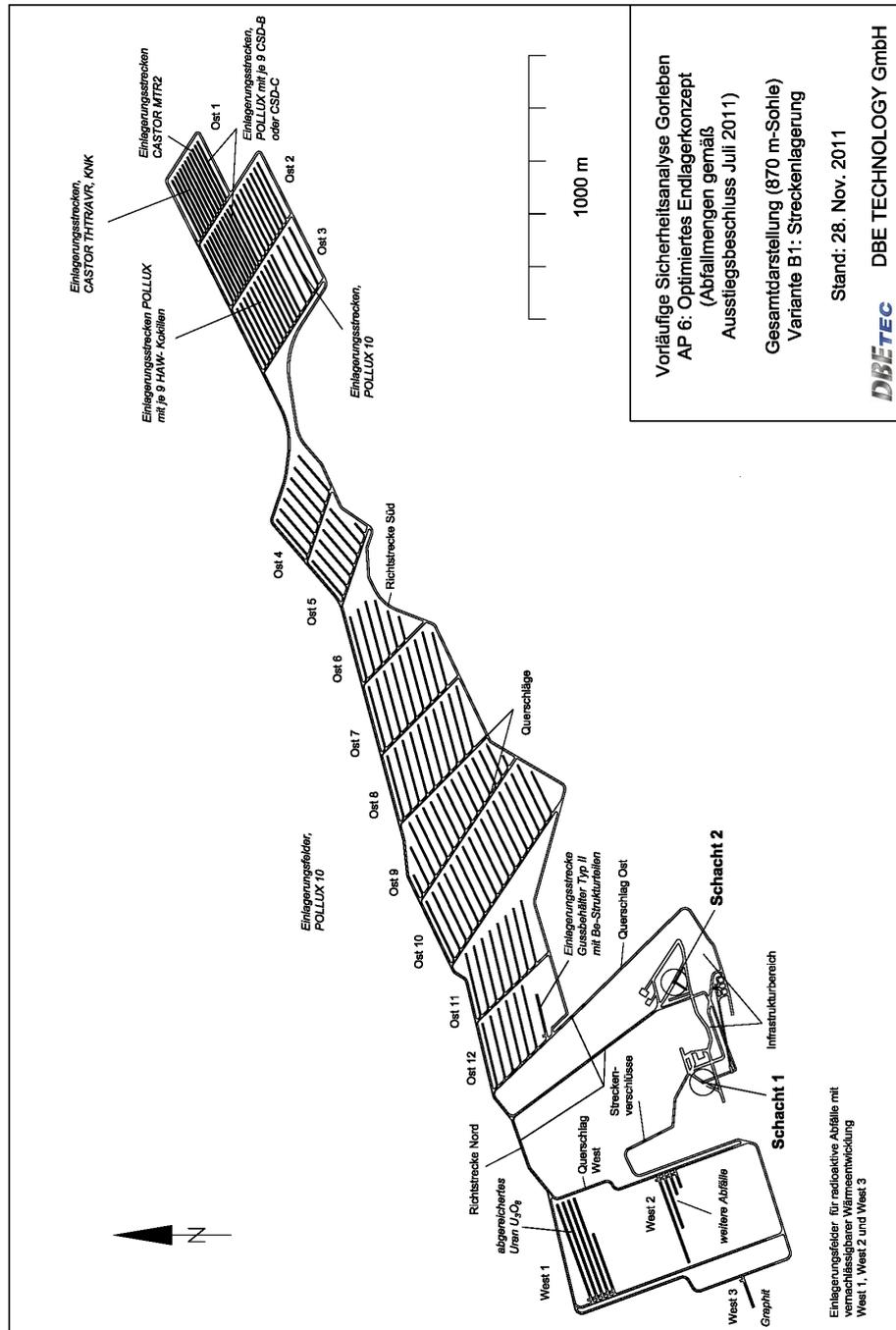
Zur Untersuchung des Salzstocks wurde in 816,5 m u. NN (840 m Teufe) eine Erkundungssohle aufgeföhren. Etwa 30 m tiefer (870 m Teufe) ist die Einlagerungssohle

vorgesehen. Grundlagen für die Endlagerplanung sind das geologische Modell des Salzstockes Gorleben von /BOR 08/ sowie die Erkundungsergebnisse aus dem Erkundungsbereich 1.

Nach Verschluss des Endlagers sind die Einlagerungs- und die Erkundungssohle vollständig voneinander getrennt. Alle Verbindungen (Schächte, Bohrungen) sind verfüllt und verschlossen. Die Sohlen selber sind – mit Ausnahme der Infrastrukturbereiche – mit Salzgrus verfüllt und am Übergang der Richtstrecken zum Infrastrukturbereich durch Streckenverschlüsse verschlossen. Die auf beiden Sohlen während der Nachverschlussphase ablaufenden Prozesse sind – mit Ausnahme weniger für die Einlagerungsbereiche spezifischer FEP – sehr ähnlich und werden durch die gleichen FEP beschrieben. Für das Referenzszenarium wird durch eine spezifische Annahme unterstellt, dass keine Wechselwirkungen zwischen den Sohlen auftreten. Bei der Ableitung von Alternativszenarien wird die Entstehung von Verbindungen zwischen den Sohlen untersucht.

Die Einlagerungsvariante AB1 /BOL 11/, /BOL 12/ sieht die Kammerlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Westflügel des Endlagers und die Streckenlagerung von Leistungsreaktor-Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen sowie von Brennelementen aus den Forschungs- bzw. Prototypreaktoren und von Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel des Endlagers vor.

Die im betrachteten Konzept relevanten Behältertypen sind der POLLUX-10 für Leistungsreaktor-Brennelemente, der POLLUX-9 für Wiederaufarbeitungsabfälle und die CASTOR AVR/THTR, CASTOR KNK und CASTOR MTR2 für Brennelemente aus Forschungs- bzw. Prototypreaktoren. Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen werden die Strukturteile der Brennelemente und ein Teil der Mischabfälle (optional auch die graphithaltigen Abfälle) in MOSAIK-Behältern (= Gussbehälter Typ 2), die Urantails in Konrad VI-Containern sowie die Mischabfälle und graphithaltigen Abfälle in Konrad IV-Containern und Konrad I-Betonbehältern endgelagert /BOL 12/.



**Abb. 4.2** Konzept des Grubengebäudes für die Einlagerungsvariante AB1 (nach /BOL 12/)

Für die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurde eine Auslegungstemperatur von 200 °C im Hauptsalz festgelegt /MÖN 12/. Außerdem halten die Einlagerungsfelder und ihre Zugangsstrecken einen Sicherheitsabstand von 50 m zu den entsprechenden Gesteinen (Kaliflöz, Anhydrit) ein, um Wegsamkeiten zu potenziell lösungsführenden

Gesteinen zu vermeiden /BOL 11/, /BOL 12/. Die Schächte und der Infrastrukturbereich wurden in der Leine-Folge aufgeföhren. Die Einlagerungsfelder sollen in dem relativ homogenen Hauptsalz der Staßfurt-Folge angeordnet werden. Dabei befinden sich die zwölf Einlagerungsfelder für Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle im Ostflügel des Endlagers und die drei Einlagerungsfelder für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle im Westflügel (Abb. 4.2). Die Einlagerungskammer für Brennelement-Strukturteile ist im schachtnächsten Einlagerungsfeld des Ostflügels angeordnet.

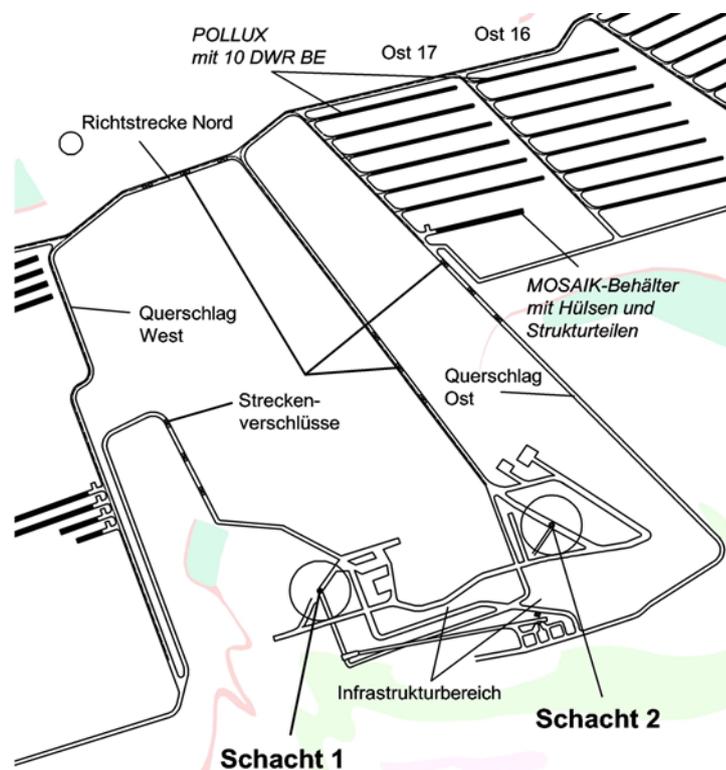
Die Abstände der Endlagerbehälter in den Einlagerungsstrecken sowie zwischen den Einlagerungsstrecken und Einlagerungsfeldern im Ostflügel ergeben sich aus thermo-mechanischen Modellrechnungen /BOL 12/. Die Einlagerung soll im Rückbau von Osten nach Westen erfolgen und im äußersten Feld mit Wiederaufarbeitungsabfällen starten. Dabei wird nach dem Ablegen eines Endlagerbehälters der Resthohlraum des Streckenabschnitts jeweils mit trockenem Salzgrus verfüllt. Sobald ein Feld befüllt ist, wird es abgeworfen. An der Einmündung der Zugangsstrecke in die Richtstrecke ist ein 10 m langer Dichtpfropfen aus Sorelbeton vorgesehen. Der Dichtpfropfen dient zur Trennung des angefeuchteten Salzgrus zur Verfüllung der Richtstrecken vom trockenen Salzgrus in den Einlagerungsfeldern mit den Querschlägen (Tab. 4.1).

In den Einlagerungskammern für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle im Westflügel werden die Abfallgebände übereinander gestapelt und der Hohlraum dann mit trockenem Salzgrus verfüllt. Sobald die Kammern eines Feldes befüllt sind, wird auch der Querschlag mit trockenem Salzgrus versetzt und das Feld an der Einmündung zur Richtstrecke durch einen Dichtpfropfen verschlossen und abgeworfen (Tab. 4.1).

Auf der Erkundungssohle in 840 m Teufe werden Richtstrecken und Querschläge mit angefeuchtetem Salzgrus verfüllt (Tab. 4.1).

Darüber hinaus sind in den Zugangsstrecken zu den Schächten etwa 150 m lange Streckenverschlüsse aus Sorelbeton vorgesehen, die jeweils aus drei Widerlagern und zwei Dichtelementen bestehen /MÜL 12b/. Die integrale Permeabilität der Streckenverschlüsse wird auf  $\leq 5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  ausgelegt /BOL 12/. Die Streckenverschlüsse sind jeweils im Hauptsalz und mit Abstand zum Kaliflöz und zum Hauptanhydrit angeordnet. Drei Streckenverschlüsse sind auf der 870 m-Sohle vor dem Übergang der Richtstrecken in den Infrastrukturbereich angeordnet (Abb. 4.3). Ein Streckenverschluss trennt

den West- und Ostflügel (Abb. 4.3 oben). Zwei Streckenverschlüsse befinden sich auf der Erkundungssohle vor dem Infrastrukturbereich (Querschlag West 1 und Ost 1).



**Abb. 4.3** Position der Streckenverschlüsse auf der 870-m-Sohle /BOL 12/

Die Infrastrukturbereiche sollen auf beiden Sohlen mit langzeitstabilem, nicht kompaktierbarem Serpentin- oder Basaltschotterversatz (ca. 38 % Porosität) verfüllt werden, um als Speicherraum für Lösungen und Gase dienen zu können, die z. B. über den Schacht zutreten bzw. aus den Einlagerungsbereichen freigesetzt werden könnten. Zusätzlich sollen im Infrastrukturbereich auf der 840 m Erkundungssohle zur Aufsättigung zutretender Lösungen ca. 19.000 Mg Bischofit eingebracht werden /MÜL 12a/.

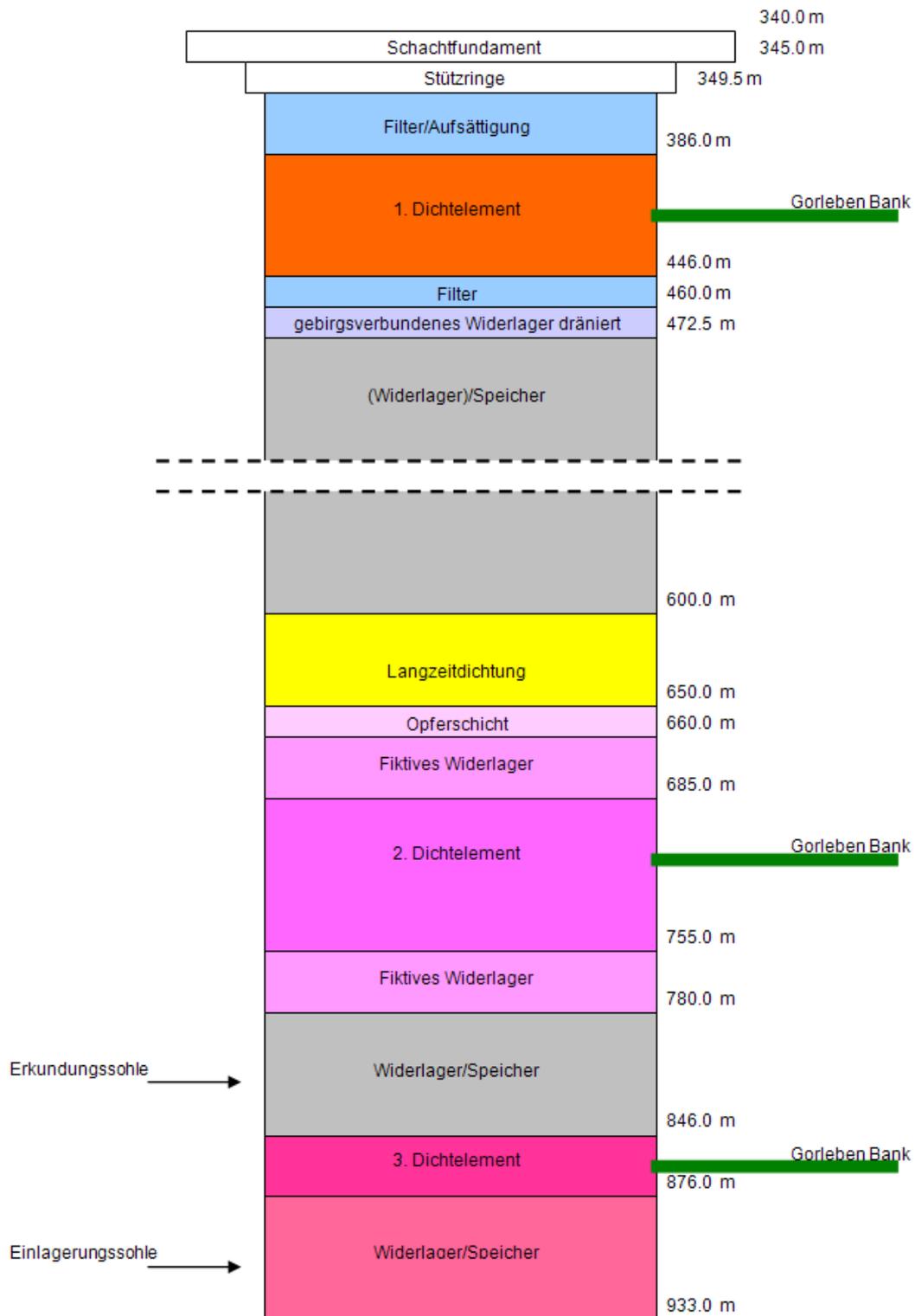
Der langzeitsicherheitsrelevante Teil der Schachtverschlüsse beginnt unterhalb der Stützringe des Schachtausbaufundamentes, die sich ca. 93 m unterhalb des Salzspiegels befinden. Dieser Teil der Schachtverschlüsse besteht aus jeweils drei Dichtelementen und Widerlagern, die an die geologische Situation in den Schächten angepasst sind /MÜL 12b/. Die Dichtelemente sollen den vertikalen Fluidstrom über den Schacht verhindern und gleichzeitig die Ausstreichbereiche der Gorleben-Bank an der Schachtkontur abdichten. Die jeweiligen Schachtverschlusskomponenten sind in Kombination gegen die unterschiedlichen Deckgebirgslösungen (Süßwasser bis schwach

salinar, sowie hochsalinare Hutgesteinslösungen) und mögliche alterierte Lösungen sowie gegen Lösungen aus dem Grubengebäude ausgelegt /LIN 12/.

**Tab. 4.2** Hydraulische Kennwerte der Funktionselemente des Schachtverschlusses gemäß /MÜL 12a/

<b>Funktionselement</b>	<b>Material</b>	<b>Lösungs-Permeabilität (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Porosität</b>
Filter	Basaltsplitt, ggf. Kies, Sand	10 <sup>-10</sup> bis 10 <sup>-12</sup>	25 – 35 %
1. Dichtelement	Ca-Bentonit	1 · 10 <sup>-17</sup>	25 – 34 %
Filter	Basaltsplitt, ggf. Kies, Sand	10 <sup>-10</sup> bis 10 <sup>-12</sup>	25 – 35 %
Gebirgsverbundes Widerlager, drainiert	Salzbeton	Kein hydraulischer Widerstand (drainiert)	
Widerlager/ Speicher	Basaltschotter	10 <sup>-7</sup> bis 10 <sup>-9</sup>	23 % (Einbringung über Falleitung)
Langzeitdichtung	Angefeuchteter Salzgrus	10 <sup>-13</sup> bis 10 <sup>-15</sup> (Anfangspermeabilität)	10 % (Anfangsporosität)
Opferschicht	Salzbeton	> 10 <sup>-10</sup>	10 %
Fiktives Widerlager	Salzbeton	Salzbeton: 7 · 10 <sup>-19</sup> , ALZ (60 cm tief 2 · 10 <sup>-15</sup> )	Salzbeton: 10 %, ALZ (60 cm tief): 1 %
2. Dichtelement	Salzbeton	Integral: 7 · 10 <sup>-19</sup> ALZ, neu (10 cm tief*)	10 %
Fiktives Widerlager	Salzbeton	Salzbeton wie Dichtelement, ALZ (60 cm tief 2 · 10 <sup>-15</sup> )	Salzbeton wie Dichtelement, ALZ (60 cm tief): 1 %
Widerlager	Basalt-/Serpentinit-schotter, techn. Bischofit (Aufsättigung)	10 <sup>-7</sup> bis 10 <sup>-9</sup>	38 % (Einbringung über Kübelförderung)
3. Dichtelement	Sorelbeton	Integral: 5 · 10 <sup>-17</sup> ALZ, neu (10 cm tief*)	16 – 24 % (Anfangsporosität, durch Quellen Reduktion)
Widerlager	Sorelbeton	Ohne Bedeutung	16 – 24 % (Anfangsporosität, durch Quellen Reduktion)

\* Um diesen Betrag ist der Schachtradius bei Ansatz der integralen Permeabilität erneut zu vergrößern.



**Abb. 4.4** Anordnung der Funktionselemente des Schachtverschlusses gemäß /MÜL 12a/

Der Schachtverschluss weist eine Reihe von Komponenten auf, die aus unterschiedlichen Materialien (Tab. 4.2) aufgebaut sind und unterschiedliche Funktionen wahrnehmen. Die Abb. 4.4 zeigt schematisch den Aufbau des geplanten Schachtverschlusses.

Ein analoges Schachtverschlusskonzept ist auch für den Schacht 2 vorgesehen, wobei die Anordnung der einzelnen Komponenten entsprechend der anstehenden Geologie im Schacht angepasst wird.

#### **4.2.2 Einlagerungsvariante AB2**

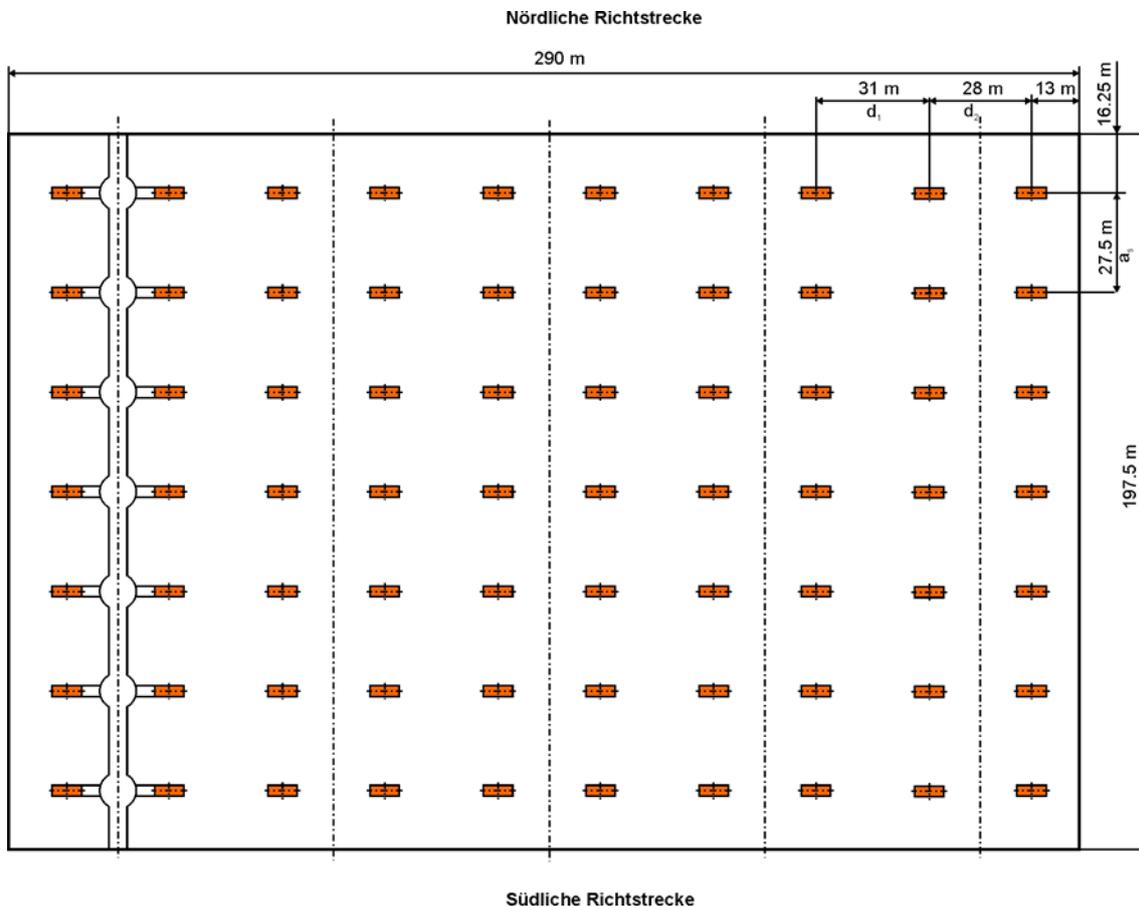
Im Kontext der VSG erfolgt für die Einlagerungsvariante AB2 nur eine Differenzbetrachtung der Variante AB2 zur Variante B1, da die Variante A unverändert bleibt. Eine vollständige Grubengebäudeplanung wurde für die Variante B2 nicht durchgeführt.

Die im Folgenden betrachtete Variante B2 /BOL 11/, /BOL 12/ sieht die Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) mit ausgedienten Brennelementen und Abfällen aus der Wiederaufarbeitung in horizontalen Kurzbohrlöchern im Ostflügel des Endlagers vor (Abb. 4.5). Dabei sind die Leistungsreaktor-Brennelemente in CASTOR Behältern der Typen V/19, V/52 und 440/84, die Forschungsreaktor-Brennelemente in CASTOR Behältern der Typen THTR/AVR, KNK und MTR 2 sowie die Wiederaufarbeitungsabfälle in verschiedenen TLB (CASTOR HAW 20/28, CASTOR HAW 28 M, TS28V, TN 85, TS28V und TGC36) verpackt. Die technische Machbarkeit wurde im Zuge des FuE-Projektes DIRECT /GRA 12/ im Auftrag der GNS mbH untersucht.

Auf der Grundlage thermomechanischer Modellrechnungen ergeben sich die Abstände zwischen den TLB und zwischen den Einlagerungsfeldern. Aufgrund der abweichenden Beladung der TLB gegenüber den POLLUX-Behältern sind die Abstände bei gleichem Temperaturkriterium größer als in der Variante B1.

Der Durchmesser der Einlagerungsbohrlöcher beträgt 2,7 m. Die Tiefe beträgt 12 m. Der TLB wird auf zwei Bronze-Gleitschienen mit Grafit auf einem Stahlschlitten in das Bohrloch geschoben. Der verbleibende Hohlraum wird mit trockenem Salzgrus verfüllt. Je Einlagerungsbohrloch ist nur ein Behälter vorgesehen.

Die Grubenraumgeometrie der Variante B2 unterscheidet sich von der Variante B1 wesentlich durch die Erstellung von Nischen mit 9,3 m Durchmesser vor den Einlagerungsbohrlöchern und durch die Anzahl und Dimension der Kurzbohrlöcher.



**Abb. 4.5** Schematische Darstellung eines Einlagerungsfeldes für 70 TLB in der Variante B2 /BOL 12/

Die Schächte und der Infrastrukturbereich sind analog zur Variante B1 in der Leine-Folge aufgefahren. Die Einlagerungsfelder sind ebenfalls im homogenen Hauptsalz der Staßfurt-Folge angeordnet. Die räumliche Ausdehnung des Grubengebäudes ist ähnlich der Variante B1, da wegen der verringerten Zahl an Einlagerungsbehältern ein größerer Einlagerungsabstand erforderlich ist. Eine Einlagerung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Brennelemente-Strukturteilen (aus der Konditionierung) ist in der Variante B2 nicht erforderlich.

Die Einlagerung erfolgt wie in der Variante B1 im Rückbau. Da keine vollständige Grubengebäudeplanung vorliegt, ist die benötigte Gesamtmenge an trockenem Salzgrus und angefeuchtetem Salzgrus zur Verfüllung nicht bekannt.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept für die Variante B2 entspricht der Variante B1. Die Spezifikationen und Positionen der Schacht- und Streckenverschlüsse sind identisch mit der Variante B1. Die Anzahl der Dichtpfropfen ist unterschiedlich, da die Anzahl der Zugangsstrecken zu den Bohrlöchern unterschiedlich ist /MÜL 12b/.

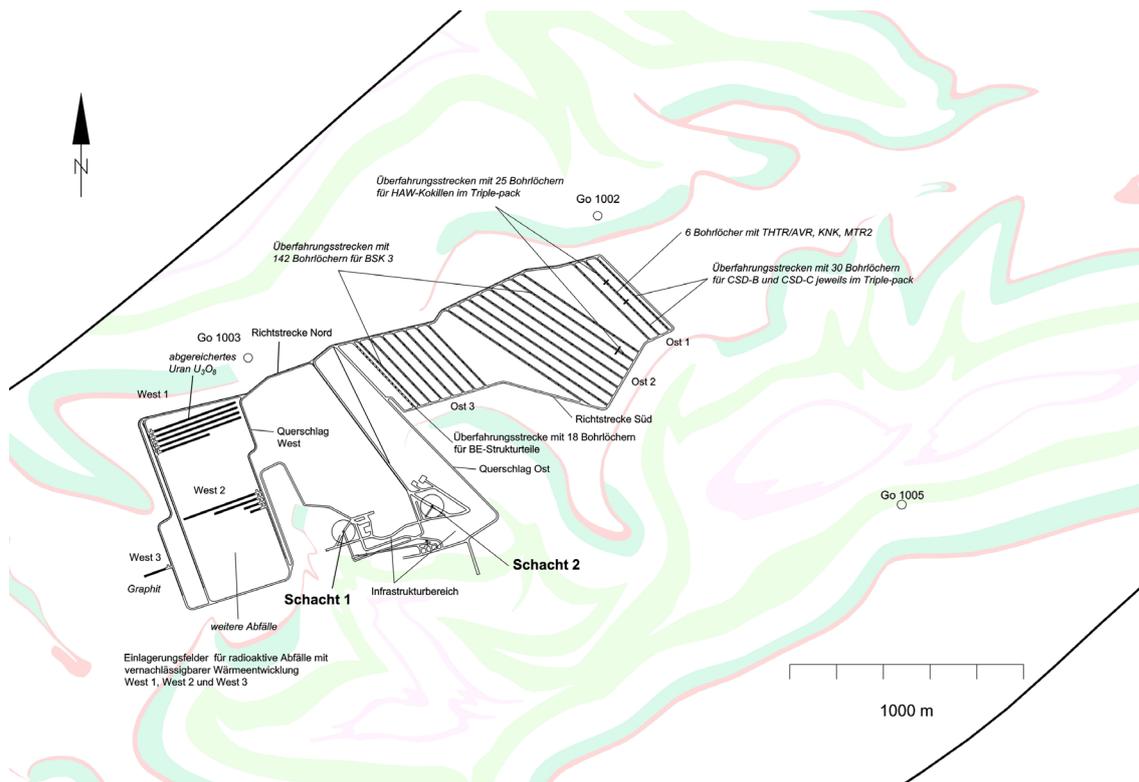
#### **4.2.3 Einlagerungsvariante AC**

Die Einlagerungsvariante AC kombiniert die Variante C mit der Kammerlagerung vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle im Westflügel des Endlagers (Variante A) kombiniert werden (Abb. 4.6). Die Variante C sieht eine Bohrlochlagerung für wärmeentwickelnde Abfälle im Ostflügel des Endlagers vor. Die Leistungsreaktor-Brennelemente und Brennelement-Strukturteile aus der Brennelemente-Konditionierung sollen in rückholbaren Brennstabkokillen (BSK) endgelagert werden /BOL 12/. Die Wiederaufarbeitungsabfälle in CSD-V, CSD-C und CSD-B sollen in rückholbaren Kokillen als Triple-Packs endgelagert werden. Die Brennelemente des AVR und THTR werden in Kannen in modifizierte BSK verpackt. Die Brennelemente der anderen Forschungs- u. Prototyp-Reaktoren werden in normale BSK gefüllt.

Die Rückholbarkeit der Behälter in der Betriebsphase und die Handhabbarkeit bis zu 500 Jahre nach Verschluss (Bergungsoption) berücksichtigt das Endlagerkonzept durch ein modifiziertes Behälterdesign der BSK und der Triple-Packs, die Verrohrung der Bohrlöcher und die Verfüllung des Hohlraums zwischen Verrohrung und Behälter mit Quarzsand.

Der Wärmeeintrag erfolgt in der Variante C im Unterschied zu den Varianten B1 und B2 nicht sölilig sondern über den gesamten Teufenbereich der Bohrungen von bis zu 300 m in den Salzstock.

Die Schächte und die Infrastrukturbereiche entsprechen den Varianten B1 und B2. Die drei Einlagerungsfelder mit 221 Einlagerungsbohrlöchern werden im Hauptsalz der Staßfurt-Folge angeordnet. Das östlichste Einlagerungsfeld enthält die CSD-C und CSD-B und die HAW-Kokillen in Triple Packs sowie die Forschungsreaktor-Brennelemente in BSK. In den anderen Einlagerungsfeldern befinden sich die Leistungsreaktor-Brennelemente in BSK. Die schachtnächste Zugangsstrecke mit 18 Einlagerungsbohrlöchern enthält Kokillen mit Strukturteilen aus der Brennelementekonditionierung.



**Abb. 4.6** Darstellung der Einlagerungsvariante AC /BOL 12/

Die Anzahl der Abfallgebinde je Einlagerungsbohrloch sowie der Abstand der Abfallgebinde, der Bohrlochstrecken und der Bohrlöcher ergeben sich aus den thermomechanischen Modellrechnungen. Die Einlagerung soll im Rückbau erfolgen und im östlichsten Feld mit Wiederaufarbeitungsabfällen starten. Sobald ein Bohrloch beladen ist, werden die oberen 10 m mit Quarzsand verfüllt, die Bohrlochschleuse entfernt und der Bohrlochkeller mit Sorelbeton verfüllt. Die Überfahrungsstrecken sowie die Querschläge werden mit trockenem Salzgrus verfüllt.

Die Variante A für die Kammerlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Westflügel des Endlagers bleibt für die Einlagerungsvariante AC unverändert. Für die 840-m-Erkundungssohle und ihre Verfüllung gilt die gleiche Planungsgrundlage wie zur Einlagerungsvariante AB1.

Das Verfüll- und Verschlusskonzept für die Schächte, Strecken und Infrastrukturbereich der Variante C ist analog zu den Varianten B1 und B2.

## 5 Referenzszenarien für die Einlagerungsvarianten

Im Vorhaben VSG werden drei Einlagerungsvarianten untersucht, für die im Folgenden jeweils das abgeleitete Referenzszenarium (R1, R2 und R3) in einem eigenen Unterkapitel dargestellt wird. Da jedes dieser Referenzszenarien auf dem gleichen Ausgangszustand des Endlagersystems unter Einbeziehung der zugrunde liegenden Einlagerungsvariante (Kapitel 4.2) unmittelbar nach dem vollständigen Verschluss des Grubengebäudes beruht, werden in Kapitel 5.1 die allgemeinen Randbedingungen dargestellt.

Eine vollständige Beschreibung wurde nur für das Referenzszenarium R1 (Kapitel 5.2) durchgeführt. Um Wiederholungen zu vermeiden, erfolgten für die Referenzszenarien R2 und R3 nur Differenzbetrachtungen.

In den darauf folgenden Kapiteln wird jeweils das Referenzszenarium als die Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems am Standort Gorleben an Hand der Initial-FEP entsprechend ihrer im Anhang A abgeleiteten Ausprägung beschrieben. Die Auswertung, ob bei diesem Ableitungsprozess alle wahrscheinlichen FEP des FEP-Kataloges Berücksichtigung finden, hat ergeben, dass dies bereits mit der zweiten Ebene der Fall ist (siehe hierzu auch Kapitel 3.3.1.1). Die Beschreibung des Endlagersystems wird unter Einbeziehung der vier im FEP-Katalog ausgewiesenen Endlagerteilsysteme „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ sowie „Deck- und Nebengebirge“ in vier Kapitel untergliedert. Für jedes Teilsystem wird die Entwicklung vom Ausgangszustand bis in eine Million Jahre beschrieben. Dabei berücksichtigt die Beschreibung eines Referenzszenariums jeweils die Einwirkdauer oder das Einsetzen der Wirkung der FEP.

Neben den Entwicklungsmöglichkeiten, die sich aus den Initial-FEP ergeben, sind auch solche Entwicklungsmöglichkeiten zu betrachten, die zu einer Radionuklidmobilisierung und zu einem daraus möglicherweise resultierenden Transport von Radionukliden führen (Kapitel 3). Dies wird für jede Einlagerungsvariante in einem Unterkapitel behandelt.

Bei der Beschreibung des Referenzszenariums wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit bis auf wenige Ausnahmen bewusst auf die Angabe von Referenzen verzichtet, da die Grundlage für die Ableitung von Szenarien der FEP-Katalog ist, der zu jedem FEP

eine Vielzahl von Referenzen und weiteren Literaturquellen vorhält. Darüber hinaus sind in den Anhängen A und B, die sich auf die Ableitung der Ausprägung von Initial-FEP und weniger wahrscheinlichen FEP beziehen, die wesentlichen bezugnehmenden Referenzen benannt.

## **5.1 Randbedingungen**

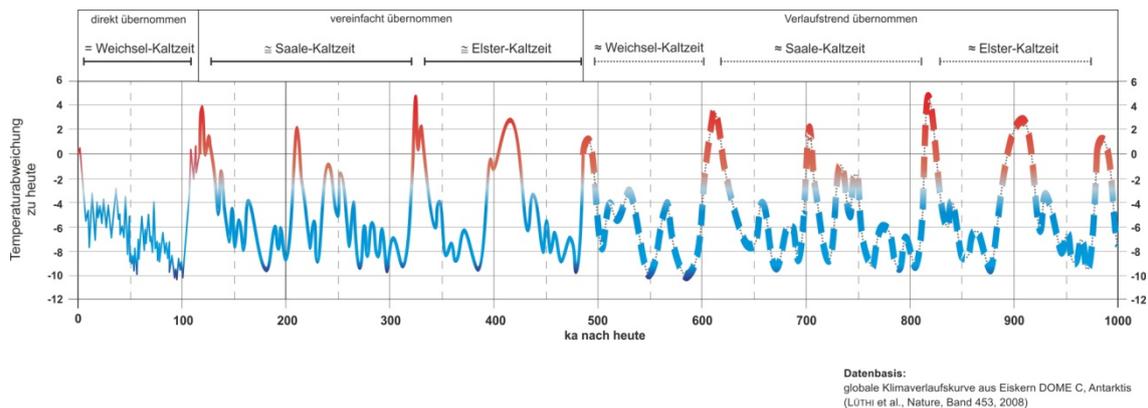
### **5.1.1 Klimabild**

Im FEP-Katalog des Vorhabens VSG sind zahlreiche geologische Prozesse beschrieben, die eine Abhängigkeit von der klimatischen Entwicklung am Standort aufweisen. Beschrieben wird die Entwicklung im FEP *Globale klimatische Veränderungen* und im Bericht zur geowissenschaftlichen Langzeitprognose /MRU 11/.

Obwohl die zukünftige klimatische Entwicklung nicht exakt prognostizierbar ist, wurde mit einer spezifischen Annahme festgelegt, dass die in den vergangenen 800.000 Jahren beobachteten 100.000-Jahre-Zyklen in Anlehnung an das Aktualitätsprinzip auch in Zukunft fortbestehen, um so die klimatisch beeinflussten Prozesse in einem Referenzszenarium berücksichtigen zu können. Auf dieser Basis können bekannte vergangene Entwicklungen in die Zukunft extrapoliert werden und z. B. als Grundlage für Szenarien oder Berechnungen genutzt werden.

Der entsprechend der Annahme verwendete 100.000-Jahre-Zyklus korreliert auch mit den Milanković-Zyklen, in denen eine aus verschiedenen Parametern berechnete Schwankungskurve der Sonneneinstrahlungsstärke wiedergegeben ist. Die Stärke der Sonneneinstrahlung gilt als ein wesentlicher Einflussfaktor der natürlichen Klimaschwankungen. Für die Klimaentwicklung bedeutet der Zyklus, dass die durchschnittliche Dauer einer Kalt- mit dazugehöriger Warmzeit 100.000 Jahre beträgt. Dieser generelle Trend enthält jedoch noch keine Aussagen darüber, in welcher Intensität die Klimaentwicklung in Zukunft ablaufen wird. Um bei der Szenarienentwicklung eine Abschätzung der wahrscheinlichen Entwicklung der klimaabhängigen geologischen Prozesse vornehmen zu können, wurde für die Zukunft ein Klimabild entworfen, das auf der vergangenen Entwicklung beruht und einen repräsentativen Rahmen für diese Abschätzungen liefert (Abb. 5.1). Die Datenbasis für diese Darstellung ist die in /LÜT 08/ veröffentlichte Klimakurve, die aus Eiskerndaten der DOME-C-Bohrung aus der Antarktis gewonnen wurde. Eine Gegenüberstellung dieser Kurve mit anderen global ermittel-

ten Klimaverläufen in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose zeigt gute Übereinstimmungen. Auch ein Vergleich mit der stratigraphischen und paläoklimatischen Einstufung Norddeutschlands und des Standortes Gorleben weist tendenziell gute Korrelationen auf /MRU 11/. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere die zeitliche Einstufung der stratigraphischen Einheiten mit zunehmendem Alter der Schichten aufgrund der vorliegenden Datenbasis Ungewissheiten aufweist.



**Abb. 5.1** Das Klimabild für das Referenzszenarium

Für die zeitliche Einstufung des Klimabildes wurde die stratigraphische Gliederung des Quartärs aus /KÖT 07/ verwendet. Entsprechend der dort angegebenen Alter wurde aus der DOME-C-Klimakurve der Bereich, der die Weichsel-, Saale- und Elster-Zeit abdeckt, ausgeschnitten. Der für die Weichsel-Zeit übernommene Bereich umfasst demnach einen Zeitabschnitt von 117.000 Jahren und beinhaltet auch die 11.500 Jahre, die zur Holozän-Warmzeit gehören. In den Ausschnitt der Saale-Kaltzeit ist die Eem-Warmzeit mit eingegliedert. Beide zusammen decken einen Bereich von ca. 228.000 Jahren ab. Insgesamt umfasst die Saale-Kaltzeit auch ohne die Eem-Warmzeit mehrere Kalt- und Warmphasen und ist daher als Komplex anzusehen. Gleiches gilt auch für den Komplex der Elster-Kaltzeit, der inklusive der Holstein-Warmzeit eine Gesamtdauer von ca. 135.000 Jahren aufweist und ebenfalls mehrere Klimaschwankungen beinhaltet. Damit beträgt die Dauer der betrachteten Abfolge von Kalt- und Warmzeiten, wie in der stratigraphischen Einteilung des Quartärs für den Standort Gorleben ausgewiesen, insgesamt ca. 480.000 Jahre.

Bei der Zusammenstellung des Klimabildes (Abb. 5.1) wurde im ersten Abschnitt, aufgrund einer Modellierung von /FOR 99/, die als nächste Kaltzeit eine der Weichsel-Kaltzeit ähnliche ergab, der Verlauf der Weichsel-Kaltzeit direkt in die Zukunft übertragen. Darauf folgen bis 480.000 Jahre in die Zukunft erneut Entwicklungen, wie sie für

die Saale- und die Elster-Abfolgen beschrieben werden. Da für diesen Zeitabschnitt keine geeigneten Modellrechnungen vorliegen, wurde der Klimaverlauf dort vereinfacht dargestellt. Eine weitere Vereinfachung, die lediglich einen generellen Verlaufstrend wiedergibt, wurde für die Zeit im Anschluss daran bis zum Ende des Nachweiszeitraums in einer Million Jahre gewählt. Auch dort folgen wieder Entwicklungen wie die Weichsel-, die Saale- und die Elster-Klimaabfolge aufeinander. Das Ende des Klimabildes bildet eine Warmzeit, die ungefähr der Holstein-Warmzeit entspricht und in einer erneuten Abkühlung mündet. Entsprechend dem 100.000-Jahre-Zyklus sind im Klimabild innerhalb des Nachweiszeitraumes zehn Kalt- und Warmzeiten enthalten, deren Ausprägungen für damit gekoppelte Prozesse (z. B. Permafrost oder Rinnenbildung) ungefähr abgeschätzt werden können.

Hinsichtlich einer anthropogenen Einflussnahme auf die Klimaentwicklung wird insbesondere die globale Erwärmung durch Treibhausgase diskutiert. Mit einer globalen Klimaerwärmung, die ein Abschmelzen der Gletscher und der Eiskappen an den Polen und damit eine Erhöhung des Meeresspiegels nach sich zieht, wird der Beginn einer neuen Kaltzeit verschoben.

Die Tab. 5.1 fasst die Merkmale zusammen, die den drei Kaltzeittypen für das Referenzszenarium zugrunde gelegt werden. Weitere Erläuterungen zu diesen Merkmalen werden in den nachfolgenden Abschnitten von Kapitel 5 geliefert.

Die Einschätzung der genannten Eismächtigkeit für die älteren Kaltzeiten lehnt sich an die Aussage der geowissenschaftlichen Langzeitprognose /MRU 11/, aus der Literatur vorliegender Modellrechnungen und den Informationen zum FEP-Katalog an. Eine Unterscheidung zwischen einer wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen zukünftigen Inlandeisentwicklung wird nicht vorgenommen. Grundlage hierfür ist das hohe Maß an Ungewissheiten für die in der Literatur genannten Inlandeismächtigkeiten auf dem mitteleuropäischen Festland. Einige Überlegungen zur Mächtigkeit des jüngeren Saalegletschers sind in /ASE 68/, /ASE 74/, /ASE 78/ und darauf basierend in /FEL 02/ (Abb. 37, s. a. /MRU 11/ S. 94) sowie in einer Modellierung von /LAM 06/ veröffentlicht. Auch die in /FEL 02/, /KAL 92/ und /BER 63/ diskutierten Werte und Modellierungen stellen jedoch nur Annäherungen an die tatsächlichen Verhältnisse in dieser Zeit dar.

Ergänzende Überlegungen zur Ausbildung des Weichsel-Gletschers, z. B. von /LAM 10/, /SKB 10/, /SIE 04/, /FOR 03/, /FOR 99/ und /BOU 85/, führen zu Eismächtig-

keiten, die in einem Abstand von ca. 150 bis 200 km vom Inlandeisrand um Werte von 1.000 m schwanken. Dieser Abstand entspricht etwa einer Entfernung Gorlebens vom früheren saale- und elsterkaltzeitlichen Inlandeisrand.

Der in Tab. 5.1 genannte Wert von 1.500 m Inlandeismächtigkeit wird für die Zwecke der Szenarienentwicklung als repräsentative Ausprägung angesehen.

**Tab. 5.1** Zusammenstellung von orientierenden Kenndaten für die drei am Standort Gorleben zu betrachtenden Kaltzeittypen

Kaltzeitmerkmal	Weichsel	Saale	Elster
Inlandvereisung	Gorleben eisfreier Standort	vollständig (Standort vom Inlandeis überfahren)	vollständig (Standort vom Inlandeis überfahren)
Eismächtigkeit	0 m	bis 1.500 m*	bis 1.500 m**
maximale Temperaturabweichung zu heute	bis -10 °C	bis -10 °C	bis -10 °C
Permafrost	Tiefenwirkung: 150 m – 200 m möglich (lag am Standort vor)	Tiefenwirkung: 150 m – 200 m Rückgang des Permafrostes (Abhängig von Dauer der Inlandvereisung und Eismächtigkeit)	Tiefenwirkung: 150 m – 200 m Rückgang des Permafrostes (Abhängig von Dauer der Inlandvereisung und Eismächtigkeit)
Rinnenbildung	nein (aufgrund der Entfernung des Inlandeises zum Standort)	möglich (weniger ausgeprägt gegenüber Elster-Kaltzeit)	möglich (liegt am Standort vor) 300 m im Lockergestein und 50 m im Festgestein
Eisvorschubrate	-	mehrere Hundert m/a im Randbereich	(mehrere Hundert m/a im Randbereich)**

\* Die Angabe ist aus /ASE 68/ entnommen.

\*\* Für die Elsterkaltzeit gibt es keine Angaben in der Literatur. Aufgrund ähnlicher Eisrandlagen und ähnlicher Klimabedingungen werden Werte aus der Saale-Kaltzeit übernommen.

### 5.1.2 Spezifische Annahmen

Gemäß Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 12/ soll sichergestellt werden, dass die Gesamtheit der in der Szenarienentwicklung abgeleiteten Szenarien die Ungewiss-

heiten in der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems abdeckt. Die spezifischen Annahmen, die für das Referenzszenarium getroffen worden sind, tragen zur Erreichung dieser Zielsetzung bei. Sie dienen im Wesentlichen dazu, den Prozess der Szenarienentwicklung zu gliedern und das Referenzszenarium sinnvoll von den Alternativszenarien abgrenzen zu können. Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen stellen dann einen Ausgangspunkt für die Ableitung von Alternativszenarien dar (Kapitel 3.3.2.1 und 6.1.1).

Die für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen wirken sich unmittelbar auf das Referenzszenarium aus. Die Notwendigkeit, spezifische Annahmen aufzustellen, ergibt sich aus unterschiedlichen Gründen. So weisen die Befunde bzw. Kenntnisse zu bestimmten Sachverhalten und Umständen, wie z. B. zur zukünftigen Klimaentwicklung, Ungewissheiten auf, die sich nur schwer bzw. überhaupt nicht ausräumen lassen. Außerdem liegen der Auslegung der geotechnischen Komponenten wie z. B. der Verschlussbauwerke begründete Annahmen zu möglichen Lastfällen zugrunde, die im Rahmen einer Vorbemessung aus der erwarteten zukünftigen Systementwicklung abgeleitet werden. Die Bandbreite der möglichen zukünftigen Systementwicklungen hängt andererseits aber z. T. von der Auslegung der geotechnischen Komponenten ab. Weiterhin sind Annahmen für die Anordnung des Grubengebäudes in der geologischen Situation am Standort zu treffen, die u. a. darauf beruhen, zu bestimmten Gesteinsschichten einen Sicherheitsabstand einzuhalten.

Im Prinzip könnten die bei den spezifischen Annahmen beschriebenen Aspekte auch mit im Referenzszenarium betrachtet werden, z. B. über Aufnahme zusätzlicher FEP in den FEP-Katalog oder durch Fallunterscheidungen. Die Beschreibung des Referenzszenariums würde dadurch unübersichtlich und schwerer nachvollziehbar. Aus diesem Grund ist es praktikabler, die Aspekte in der Form von Alternativszenarien aus dem Referenzszenarium auszugliedern.

Folgende spezifische Annahmen gelten jeweils für das Referenzszenarium für alle im Vorhaben VSG zu berücksichtigenden Einlagerungsvarianten:

- Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps

Elster ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen, die dem Verlauf der bereits auf dem Standort vorliegenden Gorlebener Rinne folgt.

- Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.
- Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) von den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.
- Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.

## **5.2 Referenzszenarium R1 zur Einlagerungsvariante AB1**

### **5.2.1 Teilsystem „Nahfeld“**

Aufgrund der unterschiedlichen Abfallarten muss zwischen dem Nahfeld im Ostflügel (Kapitel 5.2.1.1) und dem Nahfeld der im Westflügel (Kapitel 5.2.1.2) des Endlagers unterschieden werden.

Wahrscheinliche FEP mit einer direkten Beeinträchtigung einer Initial-Barriere (Initial-FEP), die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Nahfeld“ zu betrachten sind, sind in Tab. 5.2 zusammengestellt. In den nachfolgenden Beschreibungen wird auf diese FEP Bezug genommen, dabei werden auch wichtige beeinflussende FEP diskutiert (z. B. *Konvergenz*). Die Reihenfolge der diskutierten FEP orientiert sich (auch in allen folgenden Kapiteln) an sachlichen Zusammenhängen und nicht an der Reihenfolge in der Tabelle (diese ergibt sich aus der Reihenfolge im FEP-Katalog).

**Tab. 5.2** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP

FEP-Titel	* Beeinträchtigung	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Diapirismus		X		
Versagen eines Brennelement-Behälters	BEB	X		
Konvergenz		X		
Fluiddruck		X		
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien		X		
Auflösung und Ausfällung		X		
Metallkorrosion	BEB	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	BEB	X		
Auflockerungszone			X	
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	BEB	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
Thermochemische Sulfatreduktion			X	

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Nahfeld“: BEB „Brennelement-Behälter“

### 5.2.1.1 Nahfeld im Ostflügel des Endlagers

Durch die Auffahrung des Grubengebäudes kommt es zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge. Die Spannungsumlagerungen infolge der Auffahrung der Grubenräume führen an der Hohlraumkontur zu Gebirgsverformungen (Konvergenz). Das konvergierende Gebirge läuft auf den im Nahfeld trockenen porösen Salzgrusversatz (Anfangsporosität 30 % bis 40 %) auf und der Salzgrus wird kompaktiert. Es baut sich ein Stützdruck auf, der das Fortschreiten der Konvergenz hemmt. Je mehr der Salzgrus verdichtet, desto mehr verschiebt sich sein Deformationscharakter von plastisch zu (feuchteunterstütztem) zeitabhängigem Kompaktionskriechen. Durch den resultierenden Stützdruck werden das Fortschreiten der Schädigung und Dilatanz an der Hohlraumkontur gebremst und Rückbildungsprozesse initiiert. Obwohl der Versatzdruck sich dabei dem lithostatischen Druck annähert, setzt sich das Kompaktionskriechen bis zu einer geringen Restporosität von  $1 \pm 1$  % noch fort.

In welchem Umfang die Porosität und Permeabilität des Versatzes im Zuge der konvergenzbedingten Kompaktion reduziert werden, hängt von den Spannungsverhältnissen im Gebirge, der Konvergenz, dem Fluiddruck im Porenraum, der Temperatur und dem Stützdruck durch den Versatz und die Behälter ab. Im Ostflügel des Endlagers wirken sich durch die Wärmeentwicklung der eingelagerten Abfälle auch thermische Einflüsse über die Expansion oder Kontraktion auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus, die zu Auflockerungen führen können. Die hohe spezifische Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes begünstigt die Ableitung der Zerfallswärme aus den Abfällen. Das gilt mit zunehmender Kompaktion auch für den Salzgrusversatz. Sobald die Temperatur wieder abklingt, kommt es zur thermischen Kontraktion und erneut zu Spannungsänderungen.

Durch die geänderten Spannungsverhältnisse im Gebirge nach der Auffahrung der Grubenräume wird sich das Salz über das bruchlose Kriechen hinaus deformieren und an der Kontur eine Auflockerungszone ausbilden. Die Mächtigkeit dieser Auflockerungszone ist in der Regel deutlich kleiner als der Streckendurchmesser. Eine hydraulisch wirksame Auflockerungszone ist nur in der frühen Nachverschlussphase zu erwarten, da sich durch die Wechselwirkung zwischen dem durch Salzgruskompaktion gebildeten Stützdruck und dem Salzkriechen die Risse in der Auflockerungszone verschließen und auch verheilen können. Das Verschließen der Risse wird durch das viskoplastische Materialverhalten des Salzes begünstigt.

Von geringer Bedeutung ist der Einfluss des Salzaufstieges (Diapirismus) auf die Spannungsverhältnisse im Nahfeld, da davon ausgegangen werden kann, dass im Bereich des Nahfeldes das Hauptsalz der Staßfurt-Folge im Zentralteil des Salzstockes annähernd gleichmäßig aufsteigt. Da sich der Salzstock Gorleben im Nachdiapistadium befindet, sind zudem sehr kleine Fließgeschwindigkeiten zu erwarten (0,07 mm/Jahr für das Hauptsalz der Staßfurt-Folge im Einlagerungsniveau, das heißt 70 m im Nachweiszeitraum von einer Million Jahre).

Welche Spannungsverhältnisse sich im Nahfeld einstellen, lässt sich erst durch entsprechende Berechnungen, die die beschriebenen Effekte berücksichtigen müssen, ermitteln.

Im Referenzszenarium ist aufgrund intakter Verschlussbauwerke im Nahfeld von begrenzten Lösungsmengen auszugehen. Neben der Restfeuchte (siehe Anhang A) in den Behältern ist von einer geringen Feuchtemenge im Salzgrusversatz des Nahfeldes

auszugehen. Auch Fluidvorkommen im Wirtsgestein spielen als Quelle von Lösungen im Nahfeld im Hauptsalz der Staßfurt-Folge eine untergeordnete Rolle. Die Gebirgsfeuchte liegt bei 0,012 bis 0,017 Gew.-%. Zu berücksichtigen ist im Nahfeld der wärmeentwickelnden Abfälle allerdings die Möglichkeit der Thermomigration von Lösungseinschlüssen. Ein Zutritt von migrierenden Lösungen in die Einlagerungsstrecken ist nicht auszuschließen. Die Entstehung von Wasser durch mikrobielle Sulfatreduktion im Grubenbau ist ebenfalls nicht auszuschließen.

Ein Zutritt von Lösungen aus dem angefeuchteten Versatz in den Richtstrecken in die Einlagerungsfelder soll durch die Dichtpfropfen in den Querschlägen behindert werden. Außerdem beeinflussen die aus Sorelbeton bestehenden Dichtpfropfen das geochemische Milieu im Nahfeld (hohe Mg-Gehalte, hoher pH-Wert). Es ist davon auszugehen, dass die hydraulische Durchlässigkeit der Dichtpfropfen durch Korrosionsprozesse langfristig zunehmen wird.

Ein Prozess, bei dem Wasser freigesetzt wird, ist die thermochemische Sulfatreduktion. Die Rahmenbedingungen für eine thermochemische Sulfatreduktion sind im Nahfeld durch den Anhydritgehalt im Hauptsalz (im Mittel zwischen 2 und 8 Gew.-%), die vorhandenen Lösungsmengen (weniger als 0,02 Vol.-%), die im Knäuelsalz lokal vorhandenen Kohlenwasserstoffe im Wirtsgestein (bis 0,2 Vol.-%), die aus der Metallkorrosion erzeugten Wasserstoffmengen sowie die Temperatur im Nahbereich der Einlagerungsfelder (wenige tausend Jahre über 80 °C) gegeben. Zu betrachten sind die Auswirkungen der Reaktionsprodukte Wasser (Erhöhung der Fluidmengen) und Schwefelwasserstoff (Einfluss von Sulfid auf die Korrosion von Metallen) auf die Prozesse im Nahfeld sowie eine Volumenänderung des Wirtsgesteins (Kapitel 5.2.3). Weiterhin können aus der Reaktion organische Säuren (Komplexbildner) entstehen.

Bei nicht lösungsgesättigten Bedingungen entspricht der Fluiddruck im Nahfeld dem Gasdruck der eingeschlossenen Luft, er wird gegebenenfalls durch zuströmende oder gebildete Gase erhöht bzw. durch abfließende Gase erniedrigt. Ein wichtiger beeinflussender Prozess ist die Konvergenz, die gleichfalls durch Kompaktion des Salzgruses zu einer Erhöhung des Fluiddruckes führt. Im Nahfeld ist auch der Einfluss der Temperaturerhöhung auf den Fluiddruck zu berücksichtigen. Erhöhte Temperaturen führen zu einem Verdampfen von Lösungen und damit zu einer Gasbildung. Alle im Referenzszenarium betrachteten Prozesse, die zu einer Gasbildung führen, sind abhängig vom Lösungsangebot. Ohne den Zutritt wesentlicher Lösungsmengen in das Nahfeld ist die Gasbildung durch die initial vorhandene Lösungsmenge begrenzt. Falls Fluiddrücke

oberhalb der minimalen Hauptspannung im Gebirge auftreten, ist eine druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein zu betrachten.

Weitere gasbildende Prozesse im Nahfeld sind die Zersetzung von Organika (Polyethylen-Abschirmung von Behältern) und die Metallkorrosion. Unedle Metalle, insbesondere Eisen und Aluminium, sind in den Behältermaterialien enthalten und unterliegen zunächst in Gegenwart von Sauerstoff der aeroben Korrosion, bei der es nicht zu einer Gasbildung kommt. Allerdings wird der Sauerstoff im Endlager in wenigen Jahren verbraucht. Aufgrund der Mengenverhältnisse der Organika und Metalle sowie der relativen Reaktionsgeschwindigkeiten der Prozesse ist davon auszugehen, dass dann in der frühen Nachverschlussphase die Gasbildung durch die anaerobe Korrosion der Metalle überwiegt. Unter Einbeziehung der jeweils vorliegenden Bedingungen im Endlager sind entsprechende Raten für die Metallkorrosion zu berücksichtigen.

Für die POLLUX- und CASTOR-Behälter ist aufgrund ihrer Wandstärke und der begrenzten Lösungsmengen ein Versagen eines Brennelement-Behälters alleine durch flächenhafte Korrosion für das Referenzszenarium nicht zu erwarten. Lokale Korrosionseffekte müssen dennoch berücksichtigt werden, da sie eventuell auch bei geringen Feuchtemengen zu einer vollständigen Durchdringung einiger Behälter führen können. Durch die Behälterauslegung wird sichergestellt, dass der in den Sicherheitsanforderungen geforderte Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sind. Danach muss mit Versagen von POLLUX- und CASTOR-Behältern z. B. aufgrund von lokalen Korrosionseffekten gerechnet werden. Hierbei ist auch der Einfluss durch die bei der thermochemischen Sulfatreduktion gebildeten Sulfide auf die Korrosionsprozesse zu berücksichtigen.

Obwohl die POLLUX- und CASTOR-Behälter eine zu gewährleistende Funktionsdauer von 500 Jahren haben, muss bei allen Fertigungs- und Prüfverfahren eine geringe Fehlerquote unterstellt werden. Für die wahrscheinliche Entwicklung ( $\geq 10\%$ ) wird die Anzahl der Behälter mit Fertigungsfehlern anhand der Binomialverteilung berechnet. In die Verteilung gehen die Fehlerrate sowie die Anzahl der einzulagernden Behälter ein (siehe auch Anhang A). Für die Fehlerrate der behälterspezifischen Fertigungsprozesse liegen keine Daten vor, weshalb im Referenzszenarium R1 in Anlehnung an andere Endlagerprojekte eine Fehlerrate von 0,1 % angesetzt wird /WOL 12b/. Dieser Wert wird zum Zwecke der Szenarientwicklung als repräsentative Ausprägung angenommen. Unter Berücksichtigung der eingelagerten Anzahl von ca. 2.120 POLLUX-10- und ca. 511 CASTOR-Behältern wird für das Referenzszenarium die Einlagerung von bis

zu vier POLLUX-10- und einem CASTOR-Behälter mit Fertigungsfehlern unterstellt (zur Ableitung der Werte siehe Anhang A).

Da das Metall der Behälter korrodiert und damit Wasserstoff in ihrer unmittelbaren Nähe gebildet wird, ist auch eine Versprödung durch Wasserstoff zu betrachten, die zu einer Beeinträchtigung der Behältereigenschaften führen kann. Es wird aber erwartet, dass eine Versprödung nur an der Oberfläche (innen und außen) der Behälter stattfindet und die Integrität der Behälter nicht beeinträchtigt.

Da Salzgrus aus dem Hauptsalz der Staßfurt-Folge als Versatzmaterial eingesetzt wird, ist im Nahfeld von Salzgrus mit seiner an NaCl gesättigten natürlichen Feuchte auszugehen. Auflösungs- und Ausfällungsprozesse spielen im Nahfeld hinsichtlich der Einwirkungen auf die Initial-Barrieren eine untergeordnete Rolle, da davon auszugehen ist, dass die vorhandenen Materialien im Nahfeld (Hauptsalz, Salzgrusversatz) im Gleichgewicht mit dem geochemischen Milieu der mit ihnen im Kontakt stehenden vorhandenen Lösungen stehen. Weitere zu erwartende Bestandteile, die das geochemische Milieu beeinflussen, sind Magnesium und Sulfate (Sorelbeton der Dichtpfropfen und im angefeuchteten Salzgrus in den Richtstrecken), Kohlenwasserstoffe, gelöste Metallkationen (Metallkorrosion) sowie Sulfide (thermochemische Sulfatreduktion).

Klimatische Prozesse (z. B. die mit Kaltzeiten einhergehende Temperaturniedrigung) können sich nur in den salzspiegelnahen Bereichen des Wirtsgesteins und in den Schächten auswirken und haben aufgrund der vorgesehenen Teufe der Einlagerungssole keinen direkten Einfluss auf das Nahfeld. Jedoch kann es aufgrund von Auflasten, z. B. durch Gletscherüberfahrung oder Meeresüberflutung, zu Spannungsänderungen im Nahfeld kommen, deren Auswirkungen zu betrachten sind.

#### **5.2.1.2 Nahfeld im Westflügel des Endlagers**

Wesentlicher Unterschied zum Nahfeld der wärmeentwickelnden Abfälle im Ostflügel des Endlagers ist, dass bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen neben der geringeren Wärmeproduktion im Durchschnitt mehr Restfeuchte pro Gebinde und eine größere stoffliche Vielfalt, z. B. beim Inventar an Organika, vorliegt als bei den wärmeentwickelnden Abfällen. Mit den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen werden ca. 6.772 t Wasser (6.431 t Wasser in den Abfällen plus 341 t in den Behältermaterialien (Beton)) in das Endlager eingebracht. Die Prozesse der Thermomigration

und der thermochemischen Sulfatreduktion spielen aufgrund der nicht vorhandenen Wärmeleistung der Abfälle keine Rolle. Wegen des geringeren Temperaturanstieges ist auch mit einer gegenüber dem Ostflügel geringeren Konvergenzrate und damit auch langsameren Kompaktion des Salzgruses zu rechnen.

Aufgrund der Lösungsmengen können Gasbildungsprozesse initiiert werden. Aus der Gasbildung resultiert eine Erhöhung des Fluiddruckes. Hier ist bei entsprechend resultierenden Gasbildungsraten der Einfluss auf die Funktion der Streckenverschlüsse zu berücksichtigen (z. B. durch Wiederaufreißen der Auflockerungszone). Darüber hinaus ist auch eine mögliche druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein in Betracht zu ziehen. Der Einfluss der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle auf das geochemische Milieu ist vor allem bei der Betrachtung der Radionuklidmobilisierung (Kapitel 5.2.5) relevant.

## **5.2.2 Teilsystem „Strecken und Schächte“**

Aufgrund bestehender Unterschiede, z. B. Wärmeentwicklung der eingelagerten Abfallarten und anderer Grubenräume, muss auch bei den Strecken zwischen dem Ostflügel (Kapitel 5.2.2.2) und dem Westflügel (Kapitel 5.2.2.3) des Endlagers unterschieden werden. Der Infrastrukturbereich und die Schächte können gemeinsam beschrieben werden (Kapitel 5.2.2.1).

Die Initial-FEP, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu betrachten sind, sind in Tab. 5.3 zusammengestellt.

**Tab. 5.3** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	SchV, StrV	X		
Diapirismus	SchV, StrV	X		
Glaziale Rinnenbildung	SchV			X
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV	X		
Konvergenz	SchV, StrV	X		
Fluiddruck	SchV, StrV	X		
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	SchV, StrV	X		
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV	X		
Quellen des Bentonits	SchV	X		
Auflösung und Ausfällung	SchV, StrV	X		
Metallkorrosion		X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV	X		
Auflockerungszone	SchV, StrV		X	
Spannungsänderung und Spannungumlagerung	SchV, StrV	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
Thermochemische Sulfat-reduktion			X	

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Strecken und Schächte“: SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“

### 5.2.2.1 Infrastrukturbereich und Schächte

Die Schachtverschlüsse werden errichtet, um den Lösungszutritt aus dem Deck- und Nebengebirge so weit zu begrenzen, dass nur geringe Mengen an Lösungen in das Grubengebäude eindringen können. Die Schachtverschlüsse sind gegen die zu erwartenden Fluiddrücke (hydrostatischer Druck der Wassersäule im Deck- und Nebengebirge) ausgelegt. Bei der Auslegung der Schachtverschlüsse wird eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt, in der ihre Funktion gewährleistet sein muss. Die zu gewährleistende integrale Permeabilität der einzelnen Dichtelemente des Schachtverschlusses ist in Tab. 4.2 angegeben.

Nach mehr als 50.000 Jahren werden für das Referenzszenarium erhöhte hydraulischen Durchlässigkeiten der Schachtverschlüsse und somit ein verstärkter Lösungszutritt in den Infrastrukturbereich unterstellt. Erreichen Lösungen die Streckenverschlüsse, kann es dort zur partiellen Auflösung der Verschlussmaterialien bzw. zur Ausfällung gelöster Stoffinventare im Porenraum kommen. Der abfallseitig in den Richtstrecken eingebrachte, angefeuchtete Salzgrusversatz weist zu diesem Zeitpunkt eine geringe hydraulische Leitfähigkeit auf.

Neben den Lösungen, die über den Schacht zutreten, sind die Fluidvorkommen im Wirtsgestein zu berücksichtigen, die in der Leine-Folge in der Umgebung um die Schächte und den Infrastrukturbereich anzutreffen sind. Im Gegensatz zu den geringen Mengen im Hauptsalz der Staßfurt-Folge werden die Fluidvorkommen in der Leine-Folge im Wesentlichen durch die vorliegenden Störungen und Klüfte in den anhydritischen Schichten bestimmt. Auf der Grundlage der bisherigen Untersuchungen (Anhang A) werden für die entsprechenden Schichten in der Leine-Folge (Hauptanhydrit, Gorleben-Bank) Lösungsreservoire mit einem maximalen Volumen von  $5.100 \text{ m}^3$  angenommen. Für das Referenzszenarium ist anzunehmen, dass nur ein einziges Lösungsreservoir zu berücksichtigen ist und daraus  $5.100 \text{ m}^3$  Lösung in den Infrastrukturbereich zutreten.

Der Infrastrukturbereich wird mit nicht kompaktierbarem Schotter aus Basalt bzw. Serpentin versetzt. Im Gegensatz zum Salzgrus wird dieser nicht kompaktierbare Versatz durch die auflaufende Konvergenz nur geringfügig verdichtet und es baut sich schnell ein Stützdruck auf. Der Infrastrukturbereich bildet durch die Verfüllung mit nicht kompaktierbarem Versatz einen Speicher für die über den Schacht und aus dem Wirtsgestein zutretenden Lösungen.

Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen beschreibt die Beeinflussung der Barrierenbaustoffe durch veränderte geochemische Umgebungsbedingungen über die Zeit. Die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen und die Auflösung und Ausfällung von Bestandteilen der Barrierematerialien sind wichtige Teilaspekte der Alteration. Entsprechende Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse während der vorgesehenen Funktionsdauer sind auslegungsrelevant. Für diese Zeit ist durch geeignete Auslegung ihre einschlusswirksame Funktion zu gewährleisten. Durch die Art und Diversifikation der Verschlussmaterialien sowie Qualitätssicherungsmaßnahmen bei ihrer Herstellung und dem Einbau werden die Auswirkungen einer Alteration der Verschlussmaterialien in den Schachtverschlüssen auf die integrale Dichtwirkung

der Schachtverschlüsse begrenzt. Im Schachtbereich sind die oberen Dichtelemente (Bentonit, Salzbeton) so ausgelegt, dass sie für möglicherweise aus dem Deckgebirge zutretende Süß- und Salzwässer stabil sind. In den unteren Schachtbereichen, zu denen aus dem Salzgebirge oder dem Grubengebäude vor allem  $MgCl_2$ -reiche Wässer zutreten können, sind Dichtelemente und Widerlager aus Sorelbeton vorgesehen. Daher können die entsprechenden Lösungen nur schwach korrodierend wirken. Es ist somit nur eine langsame und geringe Alteration der Barrieren während der vorgesehenen Funktionsdauer zu erwarten. Diese wird bereits von Anfang an bei der Betrachtung der Eigenschaften der Barrieren, z. B. deren integraler Durchlässigkeit, berücksichtigt.

Die Schachtverschlüsse werden entsprechend dem Bemessungserdbeben (7,3 MSK) ausgelegt, so dass es durch Erdbeben zu keinen Lageverschiebungen des Schachtverschlusses kommen kann, die die Funktion des Schachtverschlusses beeinträchtigen. Aufgrund eines gebirgsverbundenen Widerlagers unter dem oberen Dichtelement kann es auch zu frühen Zeiten bei Setzungen der Schottersäule nicht zur Beeinträchtigung der Wirksamkeit des Bentonitdichtelementes kommen.

Mögliche verbleibende Ursachen für eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses sind der Salzaufstieg, Auslaugungen des Gebirges durch Mineralauflösungen im Bereich des Schachtverschlusses sowie Beanspruchungen und Lasten durch die Dichtelemente, die die Stabilität der Widerlager überschreiten. Durch die Salzbewegungen infolge des Salzaufstieges kann es während der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren zu Gebirgsbewegungen von 1,0 bis 1,5 m und zu entsprechenden Lageverschiebungen der Schachtverschlüsse kommen. Die Differenzbewegungen zwischen zwei Punkten im Bereich eines Schachtverschlusses sind deutlich niedriger anzusetzen. Die Schachtverschlüsse werden so ausgelegt, dass bei derartigen Verschiebungen über den Auslegungszeitraum die Wirksamkeit mindestens eines Dichtelementes erhalten bleibt.

Ein weiterer zu betrachtender Prozess hinsichtlich der Integrität der Schachtverschlüsse ist das Quellen des Bentonits. Bentonit ist als Baumaterial für die oberen Dichtelemente der beiden Schachtverschlüsse vorgesehen. Bei Wasseraufnahme quillt Bentonit und übt im eingespannten Zustand einen Druck auf die Hohlraumkontur und auf angrenzende Bauwerksteile aus. Dieser Prozess ist beabsichtigt, da er für die Funktionalität des Dichtelementes wichtig ist. Er hat somit einen auf die Hohlraumkontur wirkenden Stützdruck zur Folge. Der Quellvorgang wirkt der Konvergenz entgegen und sorgt für die gebirgsmechanische Einspannung dieser Elemente der Schachtver-

schlüsse. Der vorgesehene Ca-Bentonit ist mit dem Chemismus der erwarteten Lösungen kompatibel und der Quelldruck wird den Fracdruck des angrenzenden Gebirges nicht überschreiten.

Der durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle verbundene Wärmeeintrag in das Gebirge führt aufgrund der damit einhergehenden thermischen Expansion (und Kontraktion bei der späteren Abkühlung) zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen, die sich auch auf den Infrastrukturbereich und die Schächte auswirken können. Weiterhin sind im Gegensatz zum Nahfeld Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im oberen Teil der Schächte auch längerfristig zu erwarten. Diese Einwirkung tritt auf, wenn eine tiefgreifende Abkühlung des Gebirges durch die Bildung von Permafrost entsteht. Die daraus resultierende verringerte Einspannung der Dichtelemente und eine mögliche Beeinträchtigung der Schachtverschlüsse haben jedoch untergeordnete sicherheitstechnische Bedeutung, weil sie erst nach der ausgelegten Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auftreten.

In Zukunft ist am Standort Gorleben mit einer Entwicklung zu rechnen, bei der es in späteren Kaltzeiten zu einer vollständigen Eisüberdeckung kommt. Durch die Eisüberfahung werden oberflächennahe Schichten erodiert (Exaration) und/oder eistektonisch gestört. Beide Möglichkeiten beinhalten eine Destruktion bestehender Lagerungsverhältnisse. Durch diese Vorgänge kann auch eine Beeinflussung der Schachtbauwerke im obersten Bereich nicht ausgeschlossen werden. Sie tritt erst zu Zeiten auf, zu denen die Schachtverschlüsse keine Anforderungen mehr zu erfüllen haben. Aufgrund der Teufenlage des Endlagers werden Einwirkungen auf die Strecken im Sohlenniveau der Einlagerungsbereiche dagegen nicht auftreten.

Der Zutritt von Grundwässern mit variierendem Chemismus, etwa aufgrund geänderter hydrogeologischer Verhältnisse infolge einer Kaltzeit, kann dazu führen, dass dann das Quellvermögen und die Sorptionskapazität des Bentonits und damit die Funktion des oberen Dichtelementes beeinflusst werden. Außerdem können die Zement- oder Sorelphasen-haltigen Baustoffe der Bauwerke korrodiert werden. Das Maximum der Kaltzeit tritt erst zu Zeiten auf, zu denen die Schachtverschlüsse keine Anforderungen mehr zu erfüllen haben.

Ein weiterer Prozess, der sich auf die Schachtverschlüsse auswirken kann, ist eine Meeresüberflutung, die z. B. in Folge einer anthropogen bedingten globalen Klimaerwärmung auftreten könnte. Denkbar wäre bei Abschmelzen des Eises an den Polen

eine Meeresspiegelerhöhung um ca. 65 m. Dies würde am Standort Gorleben zu einer Überflutung um 45 m führen. Hieraus würde ein erhöhter hydraulischer Druck resultieren, der auf den Schachtverschluss einwirkt. Da dieser erhöhte hydraulische Druck aber bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt wurde, ist keine Beeinträchtigung der Funktion durch einen solchen Prozess zu erwarten. Gleichwohl wird aufgrund des erhöhten hydraulischen Gradienten die Durchströmung der Barriere zunehmen.

#### **5.2.2.2 Strecken im Ostflügel des Endlagers**

An definierten Stellen im Grubengebäude werden Streckenverschlüsse (Abtrennung der Einlagerungsbereiche vom Infrastrukturbereich) errichtet, die die Aufgabe haben, Lösungen von den Einlagerungsfeldern fernzuhalten bzw. die Ausbreitung kontaminierter Lösungen so lange zu verzögern, bis der kompaktierte Salzgrus die Barrierenfunktion der Verschlussbauwerke übernehmen kann. Für das Referenzszenarium wird für Streckenverschlüsse eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt, in der diese Funktion gewährleistet sein muss. Die zu gewährleistende integrale Permeabilität wird mit  $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  angesetzt.

Zusätzlich trennen Dichtpfropfen die Einlagerungsfelder mit trockenem Salzgrusversatz von den Richtstrecken mit angefeuchtetem Salzgrusversatz ab.

Im Infrastrukturbereich werden während der Nachverschlussphase  $\text{MgCl}_2$ -reiche Lösungen anstehen, da sich über den Schacht zutretende Deckgebirgslösungen am Sorelbeton und Bischofit in den Schachtverschlüssen aufsättigen werden und zudem im Infrastrukturbereich Carnallitit aufgeschlossen ist. Daher sollen die Streckenverschlüsse aus Sorelbeton errichtet werden, der in diesem Milieu langzeitstabil ist. Eine geringfügige Korrosion der Barrierenbaustoffe ist gleichwohl nicht auszuschließen, wenn die Lösungen nur unvollständig gesättigt sind. Um Ungewissheiten bezüglich des Lösungsschemismus abzudecken, werden die Streckenverschlüsse so dimensioniert („Opferschichten“ und redundante Bauelemente), dass für erwartete Umgebungsbedingungen die Funktion der Barrieren durch Korrosion während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht beeinträchtigt werden kann.

Analog zum Nahfeld führt in den Strecken die aus der Auffahrung des Grubengebäudes resultierende Änderung des Primärspannungszustandes zur Konvergenz und da-

mit einhergehend zur Veränderung der Hohlraumkontur. Dieser Prozess führt nach dem Auflaufen auf den Versatz zur Salzgruskompaktion, die mit fortschreitender Verdichtung zum Aufbau eines Stützdrucks führt. Durch den Versatzstützdruck kommt es zu Rissrückbildungs- und im Weiteren zu Rissverheilungsprozessen in der Auflockerungszone versetzter Grubenbaue. Als potenzieller Fließweg um Verschlussbauwerke ist die Auflockerungszone von sicherheitstechnischer Bedeutung. Die Auflockerungszone wird jeweils unmittelbar vor der Errichtung von Schacht- und Streckenverschlüssen sowie Dichtpfropfen in den Einbaupositionen so weit wie möglich entfernt. In diesen Bereichen ist nur mit einer Auflockerungszone zwischen 10 und 30 cm zu rechnen. Die möglicherweise verbleibende Restschädigungszone kann bei Bedarf auch durch Injektionen abgedichtet werden.

Im Unterschied zum Nahfeld wird – neben dem trockenen Salzgrusversatz in den Querschlügen abfallseitig von den Dichtpfropfen – in den Richtstrecken zwischen Dichtpfropfen und Streckenverschlüssen angefeuchteter Salzgrus als Versatz verwendet, der bei gleichen Randbedingungen deutlich schneller kompaktiert als der trockene Salzgrusversatz. Um die Feuchtemigration aus dem angefeuchteten Salzgrus in den trockenen Salzgrus zu reduzieren, trennen Dichtpfropfen aus Sorelbeton in den Querschlügen beide Bereiche. Für trockenen und angefeuchteten Salzgrus existiert nach Einbringen aufgrund von Sackungen im Versatz ein Porositätsgefälle von der Firste zum Boden einer Strecke. Durch die Konvergenz werden die dabei entstandenen Hohlräume an der Firste wieder verschlossen.

Die Wechselwirkungen zwischen den Prozessen Konvergenz, Fluiddruck und Stützwirkung des Versatzes sind im Teilsystem „Strecken und Schächte“ weitgehend identisch mit den im Nahfeld beschriebenen. Die Streckenverschlüsse sind gegen die auftretenden Fluiddrücke ausgelegt.

Für das Referenzszenarium sind die Entwicklungen von Spannungszuständen, die auf die Verschlussbauwerke innerhalb ihres vorgesehenen Wirkungszeitraumes wirken, zu beachten. Dabei sind die Veränderungen der Spannungen aufgrund der aufgefahrenen Hohlräume, der Kriechvorgänge, der Fluiddrücke, der geänderten Gebirgsauflasten sowie der Temperaturänderungen im Referenzszenarium zu berücksichtigen. Als einzige relevante Ursache für Temperaturänderungen ist die Wärmeproduktion der Abfälle anzusehen. Die im Zeitraum der frühen Nachverschlussphase wirkende Erwärmung des Salzgebirges, die durch die Zerfallswärme der eingelagerten radioaktiven Abfälle hervorgerufen wird, wirkt jedoch vor allem auf die an die Einlagerungsbereiche der

wärmeentwickelnden Abfälle angrenzenden Strecken ein. Mit der Zeit und mit zunehmender Entfernung wird dieser Einfluss schwächer, so dass auch die thermische Expansion und Kontraktion schwächer wird und die Konvergenz entsprechend weniger stark beeinflusst.

Entscheidend für die Beurteilung der Lösungsmengen in den Strecken sind die mit dem angefeuchteten Salzgrusversatz (0,6 Gew.-%) und den Verschlussmaterialien eingebrachten Lösungsmengen. Für wärmeabhängige Prozesse, bei denen Wasser entstehen kann, sind die Voraussetzungen nur stellenweise erfüllt, so dass z. B. die thermochemische Sulfatreduktion in den Strecken und Schächten als weit weniger bedeutsam als im Nahfeld einzustufen ist (Kapitel 5.2.1). Da sich in den Grubenbauen Lebensbedingungen für Mikroben einstellen können, die eine mikrobielle Sulfatreduktion zulassen, können entsprechende Wassermengen entstehen, die je nach Ausprägung des Prozesses nicht zu vernachlässigen sind.

### **5.2.2.3 Strecken im Westflügel des Endlagers**

Ein wesentlicher Unterschied zu den Verhältnissen im Ostflügel, der einen Einfluss auf die Initial-Barrieren haben kann, ist das geochemische Milieu, das sich im Westflügel des Endlagers aus der Wechselwirkung zwischen anstehenden Gesteinen und den Materialien der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle ergibt. Die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle unterscheiden sich im Stoffbestand deutlich von den wärmeentwickelnden Abfällen im Ostflügel, da sie eine Vielzahl chemischer Verbindungen (z. B. Metalle, Legierungen, Zemente, Komplexbildner, Zellulose, Bitumen, Kunststoffe, anorganische Kohlenstoffverbindungen) enthalten, die einen Einfluss auf das geochemische Milieu haben können. Die Korrosionsprodukte des Portland-Zements in Abfallgebinden und Abfallmatrix können das geochemische Milieu so beeinflussen, dass die Korrosion des Sorelbetons in Dichtpfropfen und Streckenverschlüssen erhöht wird.

Wie bereits beim Teilsystem „Nahfeld“ beschrieben, ist aufgrund der mit den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen eingebrachten Lösungsmengen mit Gasbildung zu rechnen, die wegen der Erhöhung des Fluiddrucks die Funktion der Dichtpfropfen und Streckenverschlüsse beeinträchtigen kann. Die Prozesse der Thermomigration und der thermochemischen Sulfatreduktion spielen aufgrund der nicht vorhandenen Wärmeleistung der Abfälle keine Rolle. Aus dem gleichen Grund ist

auch mit einer gegenüber dem Ostflügel geringeren Konvergenzrate und damit auch langsameren Kompaktion des Salzgruses zu rechnen.

### **5.2.3 Teilsystem „Wirtsgestein“**

Das Teilsystem „Wirtsgestein“ umfasst alle den Salzstock aufbauenden Gesteine zwischen der Salzstockbasis und dem Hutgestein abzüglich der bergmännisch geschaffenen Hohlräume und deren Auflockerungszonen.

Die Initial-FEP, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Wirtsgestein“ zu betrachten sind, sind in Tab. 5.4 zusammengestellt.

Als Folge des Kriechens des Steinsalzes werden Hohlräume im Wirtsgestein durch Konvergenz geschlossen. Dabei belegen Messungen der bisherigen Standorterkundung die gesteinspezifischen Unterschiede im Verformungsverhalten. Diese Unterschiede werden durch Einteilung des Wirtsgesteins in verschiedene Kriechklassen berücksichtigt. Der Grundspannungszustand des Salzgesteins wird durch das Auffahren der Grubengebäude gestört. Durch die resultierende Konvergenz läuft das Gebirge schließlich im Bereich der Grubengebäude nach dem Versetzen auf den Versatz auf, wodurch der Salzgrus kompaktiert wird. Dabei entsteht ein Stützdruck, der durch den Fluiddruck im Versatz noch verstärkt wird und der Konvergenz entgegen wirkt.

In der frühen Nachverschlussphase kommt die Erwärmung des Gebirges durch die Zerfallswärme der radioaktiven Abfälle hinzu. Die dadurch initiierte thermische Expansion und Kontraktion des Salzgesteins sowie die resultierenden Spannungsänderungen im Wirtsgestein sind für die Konvergenz wichtig.

Im Wirtsgestein können an den Grenzen zwischen Gesteinen mit unterschiedlichem Verformungsverhalten Spannungsgradienten entstehen, die zu einer Rissbildung führen können (Verletzung des Dilatanzkriteriums). Solche Unterschiede im Verformungsverhalten sind an den Grenzen zwischen Steinsalz und Hauptanhydrit besonders ausgeprägt. Im Wirtsgestein können weiterhin Wegsamkeiten gebildet werden, wenn die kleinste Hauptnormalspannung kleiner wird als der wirkende Fluiddruck (Verletzung des Minimalspannungskriteriums). Dieser Prozess ist vor allem am Salzspiegel relevant, wo im durchlässigen Deckgebirge eine hydrostatische Fluiddrucksäule ansteht.

**Tab. 5.4** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	WG	X		
Diapirismus	WG	X		
Subrosion	WG	X		
Bildung kryogener Klüfte	WG			X
Glaziale Rinnenbildung	WG			X
Konvergenz		X		
Fluiddruck	WG	X		
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	WG	X		
Auflösung und Ausfällung	WG	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	WG	X		
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	WG	X		
Fluidvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
Thermochemische Sulfatreduktion	WG		X	
Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	WG	X		

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Wirtsgestein“: WG „Wirtsgestein“

Wichtige Randbedingungen für die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen sind lithologische Gesteinseigenschaften des Wirtsgesteins, z. B. die Mineralogie sowie Struktur und Textur. Durch viskoplastische Deformationsprozesse (Salzkriechen) können sich im Steinsalz mechanische Spannungen bruchlos abbauen, so dass keine Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze induziert werden. Dann kommt es nicht zur Rissbildung, sondern die Deformationen verlaufen volumentreu und rissfrei oder es finden Kompaktionsprozesse statt. Aufgrund dieses viskoplastischen Materialverhaltens können Schädigungen verheilen. Besonders im Bereich von stützendem Versatz oder Verschlussbauwerken führt die Konvergenz zu einem Stützdruckaufbau in den durch die Bergbautätigkeit aufgelockerten Wirtsgesteinsbereichen, so dass Risse geschlossen und über längere Zeiträume auch verheilen können. Lokale Verformungsprozesse kommen im Salinar zum Erliegen, wenn konvergenzbedingt alle Hohl-

räume durch Kriechen bzw. Salzgruskompaktion verschlossen sind oder der Fluiddruck dem lithostatischen Druck entspricht, so dass wieder ein isotroper Spannungszustand vorherrscht. Eine weitere Einwirkung auf das Wirtsgestein in Schachtumgebung resultiert aus dem Quellen des Bentonits, das im oberen Dichtelement der Schachtverschlüsse einen Quelldruck erzeugt. Dieser Druck bewirkt einerseits eine Einspannung des Dichtelementes, die der Gebirgsspannung entgegen wirkt und andererseits einen Druckaufbau in der Kontaktfuge zwischen Dichtelement und Gebirge. Technisch wird der Quelldruck mit Hilfe der Bentonitrezeptur so eingestellt, dass er unterhalb des Fracdrucks des Wirtsgesteins bleibt. Deshalb ist die Einwirkung auf das Wirtsgestein nur als gering zu bewerten.

Im Wirtsgestein können sich bei Beanspruchungen oberhalb der Dilatanzgrenze Risse bilden z. B. im direkten Umfeld von Grubenbauen (im Nahfeld Ausbildung einer Auflockerungszone). Für das Referenzszenarium muss die Integrität der geologischen Barriere gegeben sein, das heißt, dass in dem Teil des Wirtsgesteins, der zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich gehört, keine Spannungszustände oberhalb dieser Grenze auch unter Beachtung der Veränderungen der Spannungen aufgrund der aufgefahrenen Hohlräume, der Kriechvorgänge, Fluiddrücke, geänderten Gebirgsauflasten sowie in der Folge von Temperaturänderungen auftreten. Eine Beeinflussung durch Erdbeben der Intensität bis 7,3 MSK (Bemessungserdbeben) darf keinen relevanten Einfluss auf die Integrität der geologischen Barriere haben. Nach Versatz der Grubenbaue nimmt die Robustheit gegenüber seismischen Einwirkungen rasch zu. Als die denkbar ungünstigste Konstellation in der frühen Nachverschlussphase sind die Auswirkungen eines Erdbebens auf die Grubenräume, solange der Salzgrus noch nicht kompaktiert ist, zu berücksichtigen.

Ein wahrscheinlicher Prozess, der lokal begrenzt Einfluss auf das Wirtsgestein hat, ist die thermochemische Sulfatreduktion. Die Rahmenbedingungen für eine thermochemische Sulfatreduktion sind im Wirtsgestein im Nahbereich der wärmeentwickelnden Abfälle (wenige tausend Jahre über 80 °C) durch den Anhydritgehalt im Hauptsalz (im Mittel zwischen 2 und 8 Gew.-%), die vorhandenen Lösungsmengen, die im Knäuelsalz vorhandenen Kohlenwasserstoffe (bis 0,2 Vol.-%), die durch die Metallkorrosion erzeugten Wasserstoffmengen sowie die Temperatur nur in lokal begrenzten Bereichen gegeben. Eine direkte Beeinträchtigung des Wirtsgesteins durch Umwandlungen (Sulfatverbrauch, Karbonatbildung) ist daher lokal begrenzt. Auch die aus der thermochemischen Sulfatreduktion möglicherweise resultierende Volumenzunahme (im Mittel ca.

1 %) ist aufgrund der Menge an Kohlenwasserstoffen im Wirtsgestein sind zu gering, um die einschlusswirksame Funktion des Wirtsgesteins zu beeinträchtigen /BRA 12/.

Die Möglichkeit einer druckgetriebenen Infiltration von Fluiden ins Salzgestein ist nicht auszuschließen, woraus Mikrorisse resultieren können<sup>7</sup>. Im Falle einer Gasinfiltration infolge Gasbildung im Endlager wird die ursprüngliche Dichtwirkung des ungestörten Steinsalzes wieder hergestellt, sobald der Gasdruck wieder unter den Gebirgsdruck fällt. Jedoch sind mögliche Konsequenzen (z. B. Integritätsverletzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) einer aus der Gaspermeation resultierenden Gasausbreitung im Wirtsgestein zu beachten.

Die im Wirtsgestein natürlich vorhandenen Lösungen stehen im thermodynamischen Gleichgewicht mit den Mineralphasen des jeweiligen Salzgesteins. Die sich im Gleichgewicht befindenden Auflösungs- und Ausfällungsprozesse haben keine Auswirkungen auf die Integrität des Wirtsgesteins. Eine weitere Auflösung von anstehendem Gestein durch vorhandene Lösungen ist daher nicht zu berücksichtigen.

Auflösungen können nur durch zutretende teilgesättigte Lösungen im Schacht- und Infrastrukturbereich sowie am Salzspiegel auftreten. Der Prozess der Ablaugung des Salzgesteins durch Grundwasser (Subrosion) tritt auf, wenn gering mineralisiertes Grundwasser in diesen Bereich vordringen kann. Unter Berücksichtigung der fortschreitenden Tieferlegung des Salzspiegels wird für die Zukunft eine Subrosionsrate von im Mittel 0,05 bis 0,1 mm pro Jahr erwartet, bei der es in einer Million Jahre zu einer Abtragung von 50 bis 100 m Salzmächtigkeit käme.

Für das Referenzszenarium kann davon ausgegangen werden, dass sich der Abschwächungstrend des Salzaufstieges (Diapirismus) fortsetzt, da der Salzstock Gorleben in einem tektonisch ruhigen Bereich liegt und nicht mit einem Aufbau hoher kompressiver Spannungen im Untergrund zu rechnen ist. Ebenso ist nicht damit zu rechnen, dass in diesem Zeitraum zusätzliche Sedimentmächtigkeiten von mehreren 100 Metern zur Ablagerung kommen, die über die Erhöhung des Auflastdrucks zu deutlich gesteigerten Aufstiegsraten führen würden. Für den gesamten Salzstock ist

---

<sup>7</sup> Die Konstellation der Einwirkung einer hydrostatischen Flüssigkeitssäule im Deckgebirge oberhalb des Salzspiegels, die ebenfalls auf einer druckgetriebenen Fluidinfiltration basiert, wird bei der geomechanischen Integritätsanalyse betrachtet.

von einer Aufstiegsrate von 0,02 mm/Jahr auszugehen. Darüber hinaus kann die Salzbewegungsrate des Hauptsalzes im Zentralteil des Sattels in 870 m Teufe höhere Werte aufweisen (0,07 mm/Jahr), die sich aber nicht auf den Salzspiegel übertragen. Ausgehend von der für die Vergangenheit ermittelten Rate wäre eine Salzbewegung um 70 m in einer Million Jahre möglich.

Die Ausbildung eines kontinuierlichen Permafrosts wird durch die Intensität und Dauer einer neuen Kaltzeit bestimmt und wird gemäß der für das Referenzszenarium angenommenen Klimaentwicklung frühestens in 50.000 Jahren auftreten. Am Standort Gorleben kann sich im Verlauf einer neuen Kaltzeit zu deren Hochglazial ein sporadischer, diskontinuierlicher und letztlich ein kontinuierlicher Permafrost entwickeln. In der Vergangenheit wurden in Norddeutschland Permafrostmächtigkeiten von 150 m bis 200 m erreicht, die in Zukunft auch am Standort Gorleben möglich sein werden. Obwohl die Tiefenlage der Salzstockoberfläche und die zu erwartende Abkühlung durch den Permafrost im Bereich des Salzspiegels eine zukünftige Bildung entsprechender Klüfte am Standort unwahrscheinlich erscheinen lassen, wird dieses FEP für den Salzstock Gorleben wegen der zahlreichen offenen Fragen und des bestehenden Untersuchungsbedarfs vorerst als wahrscheinlich eingestuft /WOL 12b/.

In Norddeutschland und auch am Standort Gorleben sind aus der Elster-Kaltzeit und in geringem Maße auch aus der Saale-Kaltzeit Rinnensysteme bekannt, die stellenweise bis in einige hundert Meter Tiefe reichen und eine hohe Erosionsleistung während dieser Kaltzeiten belegen. Bei einer erneuten kaltzeitlichen Rinnenbildung am Standort wäre auch die Erosion von Hut- und Salzgestein möglich.

Die Rinnenfüllung der Gorlebener Rinne unterscheidet sich nicht wesentlich von den Sedimenten, in die sie eingeschnitten wurde, weshalb sie in Zukunft kein bevorzugter Bereich für eine weitere Rinnenbildung sein wird. Das Salinar des Salzstocks verhält sich ähnlich wie Festgesteine und wird im Vergleich zu Lockersedimenten langsamer abgetragen. An Festgesteinen, z. B. Kalksteine, sind Einschnitttiefen durch Rinnen von ca. 50 m beobachtet worden, so dass ähnliche Werte auch für das Salinar angenommen werden können. Das bedeutet, dass beim Erreichen des Salzspiegels durch die Rinnenbildung während einer Kaltzeit vom Typ Saale oder Elster das Salzgestein um bis zu 50 m reduziert werden kann und dass der Salzstock ebenfalls kein bevorzugter Bereich für eine Rinnenbildung ist.

Für das Referenzszenarium wird davon ausgegangen, dass in den nächsten eine Million Jahre nur eine Rinne genau über dem Salzstock gebildet wird, die das Salzgestein um 50 m reduziert. Eine an leichtlösliche Schichten (Kaliflöz in überkippter Lagerung) gebundene vorauseilende Subrosion muss nicht zusätzlich betrachtet werden, wenn die neugebildete Rinne der Gorlebener Rinne folgt. Dort wurden diese Schichten bereits subrodiert und die abgelaugten Bereiche durch eine anschließende Halitaukristallisation wieder verschlossen. Zusätzlich zu den 50 m Abtragung könnte eine vorauseilende Subrosion nur dann wirken, wenn bei einer erneuten Rinnenbildung Bereiche erreicht werden, an denen leichtlösliche Schichten am Salzspiegel austreichen. Die Auswirkungen sind dann lokal auf diese Schichten begrenzt und nicht flächenhaft anzusetzen. Entsprechend den bisherigen Beobachtungen kann innerhalb dieser Schichten eine Ablaugung bis in eine Tiefe von ungefähr 130 m unter dem Salzspiegel stattfinden. Das Eindringen von Grundwasser ohne eine vollständige Ablaugung der leicht löslichen Salzsichten wurde bis in Tiefen von ca. 140 bis 170 m unter dem Salzspiegel nachgewiesen.

Durch Kaltzeiten bedingte Gesteinskontraktionen (bzw. Expansionen nach Beendigung einer Kaltzeit) wirken sich nur in den obersten Bereichen des Salzstocks aus und sind bereits im Teilsystem „Strecken und Schächte“ beschrieben. Außerdem würde sich eine Meeresüberflutung am Standort auf die Spannungsbedingungen im Wirtsgestein auswirken. Bei einem vollständigen Abschmelzen des Eises an den Polen würde es zu einer Meeresspiegelerhöhung um 60 bis 70 m kommen. Dies würde am Standort Gorleben zu einer Überflutung um 40 bis 50 m und einer entsprechenden Druckerhöhung führen.

Für Kaltzeiten vom Typ Saale oder Elster ist mit einer Eisüberdeckung bis 1.500 m zu rechnen (Kapitel 5.1.1). Die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Spannungszustand im Wirtsgestein sind zu berücksichtigen.

#### **5.2.4 Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“**

Im Deck- und Nebengebirge werden die Sedimente zusammengefasst, die den Salzstock umgeben. Das Hutgestein ist mit diesen Sedimenten hydraulisch verbunden und wird deshalb auch als Komponente dieses Systems betrachtet.

Da das Deck- und Nebengebirge gemäß dem Sicherheitskonzept keine einschlusswirksame Funktion aufweist, sind bei der Beschreibung des Referenzszenariums nur die Initial-FEP zu betrachten, die an der Grenze des Deck- und Nebengebirges zum Wirtsgestein wirken: dies sind die FEP *Fluiddruck*, *Subrosion* sowie *Bildung glazialer Rinnen* (Tab. 5.5). Die FEP *Erdbeben*, *Diapirismus*, *Auflösung und Ausfällung* werden dagegen nicht berücksichtigt, da diese Prozesse, wenn sie im Deck- und Nebengebirge ablaufen, das Teilsystem „Wirtsgestein“ nicht beeinflussen.

Die Einwirkungen durch Subrosion und glaziale Rinnenbildung wurden bereits für das Teilsystem „Wirtsgestein“ beschrieben.

Die Schachtverschlüsse sind gegen den Fluiddruck, der durch die Grundwässer im Deck- und Nebengebirge gegeben ist, ausgelegt. Darüber hinaus ist der Fluiddruck eine wichtige Randbedingung bei der Beurteilung des Zutrittes von Lösungen über den Schacht.

**Tab. 5.5** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP

FEP-Titel	Beeinträchtigung	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Fluiddruck		X		
Subrosion		X		
Glaziale Rinnenbildung				X

Die in der Vergangenheit beobachtete Umgestaltung der Deckgebirgsschichten in den Kaltzeiten ist auch während zukünftiger Kaltzeiten zu erwarten. Es ist aber nicht vorhersagbar, in welcher Intensität die Umgestaltung abläuft und welche Prozesse in welcher Reihenfolge aufeinander folgen. Aus diesen Gründen können keine Angaben über Art und Mächtigkeit zukünftig abgelagerter Schichten gemacht werden. Ebenso ist es nicht möglich konkret anzugeben, welche bereits vorhandenen Deck- und Nebengebirgsschichten an welcher Stelle der Oberfläche bis in welche Tiefe abgetragen werden. Bei der Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle kann diesem Umstand durch stilisierte Annahmen Rechnung getragen werden.

### 5.2.5 Radionuklidmobilisierung

Um die Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems umfassend abzubilden, setzt die Szenarienentwicklung an zwei Punkten an, die sich aus den Leitgedanken des Sicherheitskonzeptes ergeben (Kapitel 3). Zum einen werden den Initial-Barrieren, die einen Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindern sollen und deren Barrierenwirksamkeit bereits zu Beginn der Nachverschlussphase vollständig entwickelt ist, betrachtet. Zum anderen müssen die Entwicklungsmöglichkeiten betrachtet werden, die sich daraus ergeben, dass Radionuklide aus den Abfällen freigesetzt werden, ohne dass es zu einem Kontakt der Abfälle mit Lösungen gekommen ist. Der zweite Ansatzpunkt für die Entwicklung des Referenzszenariums R1 ist deshalb die Betrachtung der FEP, die die Radionuklidmobilisierung und -freisetzung sowie den Radionuklidtransport betreffen. Dazu muss gezeigt werden, in welchen Bereichen des Endlagersystems mit einer Mobilisierung von Radionukliden gerechnet werden muss und ob es zu einem Transport von Radionukliden kommen kann (Kapitel 5.4.6).

Tab. 5.6 enthält die FEP, die für das FEP *Radionuklidmobilisierung* beeinflussend bzw. auslösend sind.

Das eingelagerte Inventar in den Einlagerungsbereichen ist eine Randbedingung für das Ausmaß der Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen.

Die Lösungen im Grubenbau sind eine weitere wichtige Randbedingung für die Mobilisierung. Im Referenzszenarium sind die verfügbaren Feuchtemengen begrenzt (vgl. Kapitel 5.2.1.1).

Für das Nahfeld der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel des Endlagers ist von größeren Lösungsmengen in den Abfallgebänden auszugehen als bei den wärmeentwickelnden Abfällen (vgl. Kapitel 5.2.1.2).

**Tab. 5.6** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Radionuklidmobilisierung*

<b>FEP-Titel</b>	<b>keine zeitliche Beschränkung</b>	<b>bis ca. 10.000 a</b>	<b>ab ca. 10.000 a</b>
Inventar: Radionuklide	X		
Lösungen im Grubenbau	X		
Geochemisches Milieu im Grubenbau	X		
Versagen eines Brennelement-Behälters	X		
Korrosion der Brennstoffmatrix	X		
Korrosion von Glas	X		
Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters	X		
Metallkorrosion	X		
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	X		
Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails	X		
Zersetzung von Organika	X		
Komplexbildung	X		

Aufgrund der unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle sind auch die eingebrachten Lösungsmengen im Westflügel heterogen verteilt. Ob eine Radionuklidmobilisierung in die wässrige Phase bereits ohne weiteren Lösungszutritt erfolgen kann, ist unter Berücksichtigung der Menge und der Bindungsform des Wassers (z. B. als gebundenes Wasser, Kristallwasser oder freies Wasser) für die unterschiedlichen Abfallarten zu prüfen.

Bei graphithaltigen Abfällen sowie Mischabfällen ist von volatilen Radionukliden im Behälterinnenraum auszugehen, die bei einer Beschädigung der Behälter gasförmig freigesetzt werden.

Das geochemische Milieu, insbesondere Lösungsgehalt, pH-Wert und Redoxpotenzial bestimmen, in welchem Ausmaß Radionuklide in die wässrige Phase mobilisiert werden können. Für alle Abfallarten ist zur Bestimmung der Radionuklidlöslichkeit das geochemische Milieu einzubeziehen. Während für Glas, Brennstoffmatrix und Zement eine Vielzahl von Untersuchungen für die Bestimmung entsprechender Quellterme

vorliegen, ist diese Bestimmung für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle schwierig, da z. T. ihre genaue Zusammensetzung noch nicht bekannt ist.

Ein mögliches Versagen der Brennelement-Behälter ist bereits bei der Beschreibung der Entwicklung der Initial-Barrieren behandelt worden. Bei einem Versagen eines Behälters werden vorhandene gasförmige Radionuklide mobilisiert. Bei Kontakt mit Lösungen können weitere gasförmige Radionuklide mobilisiert werden und es ist eine Mobilisierung von Radionukliden aus der Brennstoffmatrix in die flüssige Phase zu betrachten.

Da die verglasten Abfälle keine relevanten Mengen an gasförmig freisetzbaren Radionukliden enthalten, ergeben sich aus der in den Sicherheitsanforderungen geforderten Handhabbarkeit keine zwangsläufigen spezifischen Anforderungen bezüglich der Dichtheit an die POLLUX-9-Behälter nach deren Einlagerung. Daher werden sie nicht den Initial-Barrieren zugerechnet und bei der Beschreibung der Beeinträchtigungen der Initial-Barrieren (Kapitel 5.2.1 bis 5.2.4) nicht behandelt. Eine zunehmende Leckrate ab einem frühen Zeitpunkt nach Verschluss des Endlagers ist nicht auszuschließen. Damit müssen bei ausreichenden Lösungsmengen zu späteren Zeiten eine Radionuklidmobilisierung in der wässrigen Phase und ein Radionuklidtransport über die flüssige Phase in Betracht gezogen werden.

Neben dem frühzeitigen Ausfall der POLLUX-9-Behälter ist auch ein Ausfall der Behälter für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle nach Verschluss des Endlagers für die Konsequenzenanalyse zum Referenzszenarium zu berücksichtigen. Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle ist eine Mobilisierung in die Gasphase und die wässrige Phase zu berücksichtigen.

Die Metallkorrosion betrifft außer den Brennelement-Behältern auch alle anderen Endlagerbehälter, wie z. B. die POLLUX-9-Behälter, die Stahlblechcontainer vom Typ Konrad IV und VI sowie die MOSAIK-Behälter. Außerdem werden metallische Abfälle (vor allem kompaktierte Strukturteile der direkt endgelagerten Brennelemente in MOSAIK-Behältern bzw. Hüllrohre und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung in POLLUX-9-Behältern) korrodiert. Bei der Korrosion aktivierter Metallteile können auch Radionuklide in die Gasphase mobilisiert werden.

Eine Materialversprödung der Zirkalloy-Hüllrohre der Brennelemente durch Wasserstoffaufnahme kann die Mobilisierung von Aktivierungsprodukten aus den Hüllrohren beeinflussen.

Da die Behälter für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle nicht gegen den Gebirgsdruck ausgelegt sind, ist ein frühzeitiger Ausfall möglich und Radionuklide werden durch die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen aus den zementierten Abfällen mobilisiert. Neben der Mobilisierung der Radionuklide aus diesen Abfällen hat die Korrosion der Betonbehälter einen Einfluss auf das geochemische Milieu.

Die Zersetzung von Organika betrifft im Nahfeld der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel des Endlagers einerseits organische Abfälle und andererseits Abfallmatrizes aus Bitumen oder Kunststoff. Da davon auszugehen ist, dass die Behälter für diese Abfälle zeitnah ausfallen, werden die Matrizes und die Abfälle zersetzt und die Radionuklide werden mobilisiert. Im Ostflügel des Endlagers betrifft die Zersetzung von Organika die Polyethylenstäbe, die zur Neutronenmoderation in CASTOR und POLLUX-Behältern eingebaut sind.

### **5.2.6 Radionuklidtransport**

Der Transport von Radionukliden ist sowohl auf dem Gaspfad als auch auf dem Lösungspfad zu betrachten.

Tab. 5.7 enthält die FEP, die für die FEP *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* und *Radionuklidtransport in der Gasphase* beeinflussend sind.

Die Mobilisierung als wesentliche Voraussetzung für den Transport wurde bereits im vorangegangenen Kapitel detailliert beschrieben.

Wesentliche Voraussetzung für einen advektiven Transport von Radionukliden sind die zugrunde liegenden Strömungsprozesse und das Vorhandensein von Migrationswegen. Die wesentlichen Antriebsmechanismen für Strömungsprozesse von Lösungen sind der hydraulische Gradient, Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Lösungen (Auftrieb) oder innerhalb einer Lösung (Konvektion) sowie im Grubengebäude die Konvergenz. Strömungsvorgänge in der Gasphase werden durch Gasbildung, die Konvergenz und den Auftrieb verursacht.

**Tab. 5.7** Beeinflussende FEP für die FEP *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* und *Radionuklidtransport in der Gasphase*

<b>FEP-Titel</b>	<b>keine zeitliche Beschränkung</b>	<b>bis ca. 10.000 a</b>	<b>ab ca. 10.000 a</b>
Radionuklidmobilisierung	X		
Radioaktiver Zerfall	X		
Advektion	X		
Mechanische Dispersion	X		
Diffusion	X		
Matrixdiffusion	X		
Sorption oder Desorption	X		
Komplexbildung	X		
Kolloide	X		

Ein hydraulischer Gradient ist nach Verschluss des Endlagers zunächst nur an den Schachtverschlüssen zu betrachten, da nur oberhalb der Schachtverschlüsse relevante Lösungsmengen anstehen. Der Zutritt von Lösungen ins Grubengebäude läuft sehr langsam ab und die zutretenden Flüssigkeitsmengen sind während der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse im Vergleich zum Speichervolumen im Infrastrukturbereich gering.

Die Durchströmung der Verschlussbauwerke und des Versatzes wird durch deren Strömungswiderstand und gegebenenfalls durch den Gaseindringdruck beeinflusst. Dabei ist insbesondere bei den Schacht- und Streckenverschlüssen eine Auflockerungszone zu berücksichtigen. Mit zunehmender Kompaktion erhöht sich der Strömungswiderstand des Salzgrusversatzes.

Durch die Konvergenz infolge des Salzkriechens werden die gasgefüllten Hohlräume komprimiert und es kommt zu Gasströmungen im Grubengebäude. Da die Verschlussbauwerke und der Versatz nicht gasdicht sind, muss im Referenzszenarium eine Freisetzung über den Gaspfad betrachtet werden. Da neben den Gasen auch Lösungen (durch vorhandene Lösungsmengen, z. B. Versatzfeuchte, und die zutretenden Lösungsmengen) im Grubengebäude vorliegen, ist im gesamten Grubengebäude von einem Zweiphasenfluss auszugehen.

Inwieweit ein advektiver Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen und letztlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglich ist, hängt davon

ab, ob ein Transportpfad existiert, bevor die Konvergenz und die Gasbildung abgeklungen sind, die den hydraulischen Druckgradienten hervorrufen.

Wenn die wesentlichen Antriebsprozesse für einen advektiven Transport zum Erliegen kommen, ist die Diffusion der dominierende Transportprozess für Radionuklide. Obwohl der diffusive Transport in der Regel ein vergleichsweise langsamer Transportprozess ist, muss er aufgrund des langen Nachweiszeitraumes betrachtet werden.

Die Transportzeit ist ein wichtiger Faktor hinsichtlich der Sicherheitsaussage, da während des Transports Radionuklide in Abhängigkeit von ihrer Halbwertszeit zerfallen.

An Salzgestein ist Sorption von Radionukliden meist vernachlässigbar. Da Salzgrus als Versatz verwendet wird, spielt Sorption in den versetzten Strecken meist keine Rolle bei der Rückhaltung von Radionukliden. Hinsichtlich der Sorptionseigenschaften der Basalt- bzw. Serpentinitschotter sind z. Z. keine belastbaren Daten bekannt. Bedeutend ist die Sorption von Radionukliden an Korrosionsprodukten der Metalle (z. B. Magnetit in NaCl-reichen oder an Eisen(II)-Hydroxiden in Mg-reichen Salzlösungen) im Einlagerungsbereich, den Verschlussmaterialien und deren Korrosionsprodukten sowie an Mineralphasen in Deckgebirgsschichten. Im Bereich der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle findet zudem Sorption an zementierten Abfällen sowie deren Korrosionsprodukten statt.

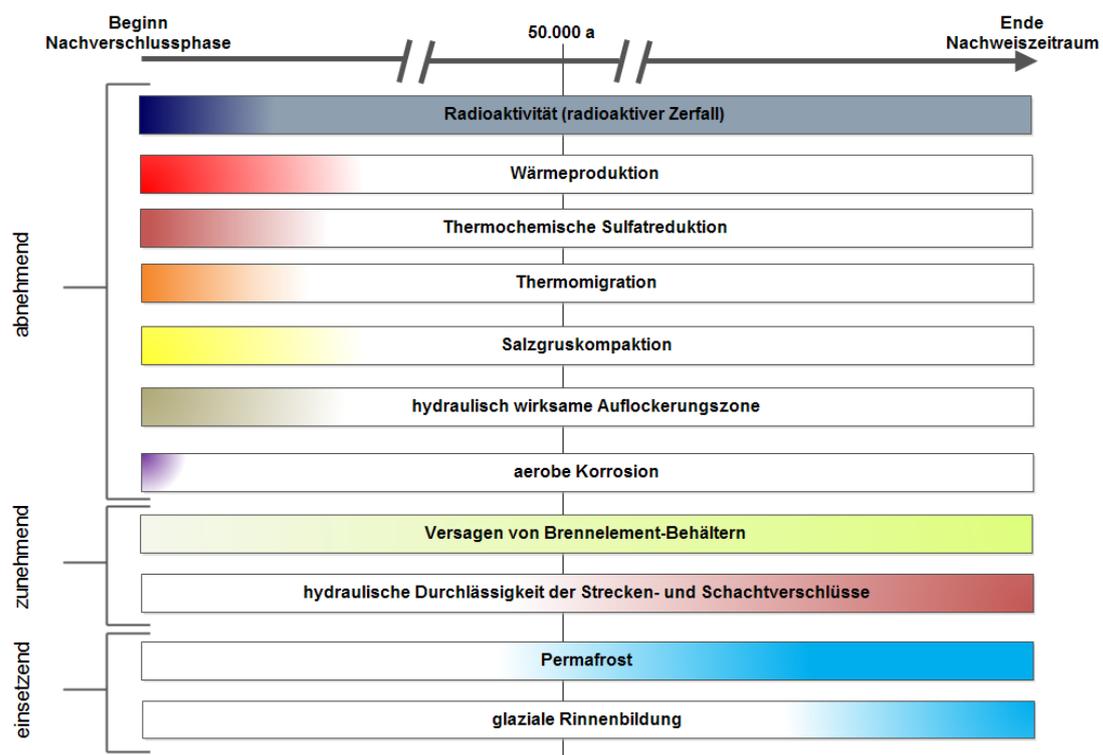
Gelöste Radionuklide können Komplexe bilden. Folge ist eine Erhöhung der Gesamtkonzentration an Radionukliden (gelöst und komplexiert) in der flüssigen Phase. Vor allem bei der Beurteilung des Transportes schwerlöslicher Radionuklide, z. B. der Actiniden, ist die Komplexbildung bedeutsam.

Die Relevanz des Transportes von Radionukliden an Kolloiden oder als Eigenkolloide ist unklar, spielt aber voraussichtlich keine bedeutende Rolle für die Bewertung der Transportprozesse.

### **5.2.7 Zeitliche Entwicklung von Aspekten**

Hinsichtlich der Entwicklung des Endlagerstandortes ist eine Vielzahl von Aspekten zu berücksichtigen (z. B. Erosion und Sedimentation), die bezüglich ihres Auftretens und Wirkens keiner zeitlichen Beschränkung unterliegen. Die Aspekte stellen Prozesse oder Zustände dar, die sich zeitlich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten einordnen

lassen. So gibt es Prozesse bzw. Zustände, die zum Zeitpunkt der Einlagerung bereits ablaufen und deren Intensität mit der Zeit abnimmt (abnehmender Aspekt). Andere Prozesse bzw. Zustände wiederum weisen zu Beginn der Nachverschlussphase eine geringe Ausprägung auf, die dann mit fortschreitender Zeit zunimmt (zunehmender Aspekt). Eine weitere Gruppe tritt unter gegebenen Voraussetzungen erst zu einem späteren Zeitpunkt in der Nachverschlussphase auf (einsetzender Aspekt). Die Abb. 5.2 gibt die verschiedenen genannten zeitlichen Entwicklungsmöglichkeiten einiger relevanter Aspekte wieder.



**Abb. 5.2** Tendenzielle Darstellung der zeitlichen Entwicklung einiger Aspekte

Von den dargestellten Aspekten kann die Mehrzahl hinsichtlich ihrer zeitlichen Beschränkung nicht exakt vorhergesagt werden. Daher beinhaltet die Abb. 5.2 auch nur eine orientierende Zeitmarke bei 50.000 Jahren, die mit der Funktionsdauer, für die die Strecken- und Schachtverschlüsse ausgelegt sind, und der zunehmenden Möglichkeit einsetzender kaltzeitlicher klimatischer Veränderungen zusammenfällt. Eine weitere Angabe von Zeitmarken bzw. eine Zeitskala würde eine Genauigkeit vorgeben, die aufgrund bestehender Ungewissheiten hinsichtlich des Ablaufes einzelner Aspekte nicht gegeben ist. Für diese Aspekte lassen sich jedoch einschätzende zeitliche Ein-

ordnungen in Phasen oder Abschnitte bezüglich ihres Wirkens bzw. Eintretens in der Nachverschlussphase angeben.

Aus den in der Abb. 5.2 dargestellten Aspekten ist die abnehmende Radioaktivität der eingelagerten Abfälle aufgrund des radioaktiven Zerfalls derjenige Zustand, der für die Radionuklide gut bestimmt werden kann. Aus diesem Grund lassen sich auch verlässliche Aussagen hinsichtlich der Wärmeproduktion ableiten. Damit ist ebenfalls für die temperaturbeeinflussten Prozesse Thermochemische Sulfatreduktion und Thermomigration eine Einordnung der zeitlichen Wirkungsphase möglich. Ab einem bestimmten Zeitbereich reicht die nachlassende Wärmeproduktion nicht mehr aus, um die notwendigen Temperaturen für die Initiierung dieser Prozesse aufkommen zu lassen. Für beide Prozesse werden nach einigen hundert Jahren die notwendigen Initiierungstemperaturen bzw. Temperaturgradienten nicht mehr erreicht. Weiterhin wird sich die Temperatur im Endlager nach wenigen tausend Jahren dem Ausgangszustand wieder annähern (siehe FEP *Wärmeproduktion, Thermochemische Sulfatreduktion und Thermomigration* in /WOL 12b/).

Die Salzgruskompaktion wird so lange ablaufen, bis Gleichgewichtsbedingungen vorliegen. Diese Gleichgewichtsbedingungen werden sich schätzungsweise nach wenigen tausend Jahren einstellen.

Mit der Auffahrung von Grubenbaue entsteht aufgrund der mechanischen Schädigung eine Auflockerungszone an der Hohlraumkontur, die mit der Zeit aufgrund des Konvergenzprozesses wieder verheilt. Für diesen Verheilungsprozess wird je nach Schädigungsgrad, Spannungsentwicklung und Größe der Auflockerungszone ein Zeitraum von einigen hundert bis wenigen tausend Jahren abgeschätzt (siehe FEP *Auflockerungszone* in /WOL 12b/).

Für den Prozess der aeroben Korrosion wird eine zeitliche Beschränkung von wenigen Jahren abgeschätzt. Die anaerobe Korrosion hingegen unterliegt keiner zeitlichen Beschränkung (siehe FEP *Metallkorrosion* in /WOL 12b/).

Nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ bestehen an die Brennelement-Behälter die Anforderungen, dass sie während der Betriebszeit rückholbar eingelagert werden müssen und dass sie in den ersten 500 Jahren der Nachverschlussphase, unter Zugrundelegung der wahrscheinlichen Standortentwicklung, eine Freisetzung radioaktiver Aerosole verhindern und zudem für eine Bergung handhabbar sein müssen. Gleich-

wohl ist nicht auszuschließen, dass eine geringe Anzahl von Brennelement-Behältern während der Nachverschlussphase aufgrund von Fertigungsdefiziten frühzeitig versagt. Nach Ablauf der vorgesehenen Funktionsdauer ist ein Versagen von Brennelement-Behältern durch chemische und/oder mechanische Einwirkungen nicht auszuschließen. Insgesamt ist festzuhalten, dass mit der Zeit die Anzahl der defekten Brennelement-Behälter zunimmt. Über die Anzahl dieser Behälter und mögliche Häufungspunkte für ein Versagen entlang des Zeitstrahles können keine Aussagen gemacht werden.

Für das Referenzszenarium wird eine Funktionsdauer für die Strecken- und Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren gemäß den Auslegungsplanungen zugrunde gelegt. In Bezug auf die Schachtverschlüsse ist nach dieser Funktionsdauer aufgrund zukünftiger Kaltzeiten eine Beeinträchtigung der oberen Teile der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen. Auch eine Beeinträchtigung der Funktion der anderen Dichtelemente durch Korrosion ist infolge eines geänderten Chemismus der zutretenden Lösungen möglich. Bei den Streckenverschlüssen können analog zu den Schachtverschlüssen nach der Funktionsdauer die Dichtelemente durch Korrosion infolge eines geänderten Chemismus von zutretenden Lösungen beeinträchtigt werden. Für beide Verschlussysteme ist nach der Funktionsdauer von einer Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit auszugehen.

Zu den Prozessen, die erst zu einem späteren Zeitpunkt in der Nachverschlussphase einsetzen, gehört die Bildung von Permafrost. Ein kontinuierlicher Permafrost könnte sich ab ca. 50.000 Jahre nach heute bis zum Maximum der nächsten Kaltzeit entwickeln, wobei Unterbrechungen während wärmerer Zeitabschnitte möglich sind (siehe FEP *Permafrost* in *WOL 12b/*). Für das Referenzszenarium wurde ein Klimabild vorgegeben (Kapitel 5.1.1), nachdem in der Nachverschlussphase von zehn Kaltzeiten unterbrochen von entsprechenden Warmzeiten auszugehen ist. Das heißt, dass sich im Prinzip zu jeder dieser Kaltzeiten am Standort Gorleben Permafrost entwickeln kann. Diesen Sachverhalt gibt Abb. 5.2 bewusst nicht wieder, da in der Abbildung ausgedrückt werden sollte, wann mit einer Möglichkeit des Einsetzens von Prozessen zu einem späteren Zeitpunkt in der Nachverschlussphase zu rechnen ist.

Ein weiterer Prozess, der eine Verknüpfung mit Kaltzeiten aufweist, ist die glaziale Rinnenbildung. Hierbei muss die Kaltzeit eine vollständige Inlandvereisung am Standort bewirken. Darüber hinaus muss die Kaltzeit derart ausgeprägt sein, dass sie vom Typ her, der in der Vergangenheit aufgetretenen Elster-Kaltzeit entspricht. Mit dem

Rückzug des Gletschers, das heißt am Ende der Kaltzeit, werden aufgrund der unter hohen Druck wirkenden Schmelzwässer die Rinnen gebildet. Für das im Referenzszenarium zugrunde liegende Klimabild bedeutet das, dass eine glaziale Rinnenbildung ab ca. 480.000 Jahren nach heute möglich ist.

### **5.3 Referenzszenarium R2 zur Einlagerungsvariante AB2**

Die folgende Beschreibung des Referenzszenariums R2 für die Einlagerungsvariante AB2 (horizontale Bohrlochlagerung von Transport- und Lagerbehältern) erfolgt als Differenzbetrachtung zur ausführlichen Beschreibung bei der Einlagerungsvariante AB1 (siehe hierzu Kapitel 3.1.5 und 4.2.1). Für die Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems wurden die gleichen Initial-FEP wie für die Einlagerungsvariante AB1 identifiziert. Aufgrund der Einlagerung der Behälter in horizontale Bohrlöcher und der veränderten räumlichen Anordnung der Abfallgebände ergeben sich z. T. andere Ausprägungen und Wechselwirkungen zwischen den FEP.

Beibehalten wird auch die Aufteilung der Beschreibung des Endlagersystems entsprechend den vier im FEP-Katalog ausgewiesenen Endlagerteilsystemen „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ sowie „Deck- und Nebengebirge“. Die wesentlichen Abweichungen zur Einlagerungsvariante AB1 treten im Nahfeld auf. Die Eigenschaften der anderen Teilsysteme und die meisten in ihnen ablaufenden Prozesse werden durch weitreichende Prozesse (z. B. thermomechanische Einwirkungen) beeinflusst. Unverändert sind geologische Prozesse (z. B. Diapirismus) oder Klimaentwicklungen, die daher auch nicht erneut beschrieben werden. Das Verfüll- und Verschlusskonzept sowie die Einlagerung der Abfälle im Westflügel des Endlagers (Variante A) entsprechen – abgesehen von der Verfüllung der Bohrlöcher und Einlagerungsnischen – der Einlagerungsvariante AB1. Aus diesem Grund wird die Variante A nicht erneut beschrieben und die folgenden Ausführungen beziehen sich nur noch auf die Variante B2 aus der Kombination der Einlagerungsvariante AB2.

Da die Ausprägung vieler Initial-FEP im Nahfeld gegenüber der Einlagerungsvariante B1 abweicht, ist davon auszugehen, dass sich Unterschiede bei der Systementwicklung auch im Hinblick auf die Radionuklidmobilisierung und einem daraus möglicherweise resultierenden Transport von Radionukliden ergeben werden.

### 5.3.1 Teilsystem „Nahfeld“

Im Folgenden werden die Abweichungen der Systementwicklung beschrieben, die sich aus der Endlagerung der Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle in horizontalen Bohrlöchern in den nordöstlichen Einlagerungsbereichen ergeben.

Die Tab. 5.8 enthält die Initial-FEP, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Nahfeld“ zu betrachten sind. FEP, deren Ausprägung infolge der horizontalen Bohrlochlagerung von der Variante B1 abweichen, sind unterstrichen hervorgehoben dargestellt.

Die horizontalen Einlagerungsbohrlöcher sind deutlich kleiner als die Einlagerungsstrecken der Endlagervariante B1. Vor jedem Bohrloch wird eine große Nische für das Einlagerungsequipment aufgefahren. Durch die andere Grubenraumkonfiguration kommt es gegenüber der Variante B1 zu anderen Spannungsverhältnissen im Gebirge und in der Folge zu einer abweichenden Ausprägung der Konvergenz und der Auflockerungszone. Eine hydraulisch wirksame Auflockerungszone ist im Nahfeld nur in der frühen Nachverschlussphase zu erwarten, da sich durch die Wechselwirkung zwischen dem durch die Behälter und den Salzgrus gebildeten Stützdruck und dem Salzkriechen die Risse in der Auflockerungszone verschließen und auch verheilen können.

Aufgrund der Behälterbeladung, der Einlagerung in horizontalen Bohrlöchern und der Anordnung der Behälter ändert sich auch die räumliche Temperaturverteilung im Nahfeld. Hieraus ergeben sich abweichende thermomechanische Spannungsverhältnisse im Gebirge. Der Ringspalt zwischen Behältern und Bohrlochwandung beträgt nur wenige cm und wird zudem mit Salzgrus verfüllt. Dadurch sowie durch das beschleunigte Salzkriechen aufgrund der heißen Behälter werden die Abfallgebinde rasch im Salz eingeschlossen sein.

Die aus der Temperaturentwicklung resultierenden thermomechanischen Spannungen wirken sich auch auf die Auflockerungszone aus und können in der thermischen Phase die Rissverheilung begünstigen. Nach Abklingen der Wärmeproduktion und Rückgang der Temperaturen kommt es durch Gesteinskontraktion zu erneuten Spannungsänderungen.

**Tab. 5.8** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (hervorgehobene unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

<b>FEP-Titel</b>	<b>Beeinträchtigung*</b>	<b>keine zeitliche Beschränkung</b>	<b>bis ca. 10.000 a</b>	<b>ab ca. 10.000 a</b>
<u>Diapirismus</u>		X		
<u>Versagen eines Brennelement-Behälters</u>	BEB	X		
<u>Konvergenz</u>		X		
<u>Fluiddruck</u>		X		
<u>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien</u>		X		
Auflösung und Ausfällung		X		
<u>Metallkorrosion</u>	BEB	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
<u>Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme</u>	BEB	X		
<u>Auflockerungszone</u>			X	
<u>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</u>	BEB	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
<u>Thermochemische Sulfatreduktion</u>			X	

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Nahfeld“: BEB „Brennelement-Behälter“

Welche Spannungsverhältnisse sich im Nahfeld einstellen, lässt sich wie bei Variante B1 erst durch entsprechende Berechnungen, die die beschriebenen Effekte berücksichtigen müssen, ermitteln.

Ohne den Zutritt zusätzlicher Lösungsmengen über die Schacht- und Streckenverschlüsse ist im Referenzszenarium im Nahfeld nur von begrenzten Lösungsmengen auszugehen (vor allem Gebirgsfeuchte sowie Restfeuchte im Salzgrusversatz). Neben den begrenzten Lösungsmengen kann noch Restfeuchte (siehe /WOL 12b/ und Anhang A) in den CASTOR-Behältern vorhanden sein. Im Hinblick auf die Lösungsmengen sind außerdem die thermochemische Sulfatreduktion (während der thermischen Phase) sowie die mikrobielle Sulfatreduktion (nach Abklingen der Temperatur) zu berücksichtigen.

Der Fluiddruck wird im Nahfeld durch den Gasdruck der eingeschlossenen Grubenluft und der gebildeten Gase bestimmt. Die vorhandenen Lösungsmengen werden zu einer Metallkorrosion der TLB (von innen und von außen) führen. Der dabei gebildete Wasserstoff kann zu einer Druckerhöhung innerhalb des Einlagerungsbohrlochs bzw. in den Behältern führen. Weitere gasbildende Prozesse sind die Zersetzung von Organika (Polyethylen-Abschirmung von Behältern), mikrobielle Prozesse und die Radiolyse der Feuchtigkeit im Salzgrus und im Behälter. Die Gasbildung durch Metallkorrosion wird dabei durch die verfügbaren Lösungsmengen begrenzt.

Durch die Gasbildung kann der Fluiddruck in der Auflockerungszone erhöht und so das Verschließen der Risse verhindert werden. Es wird nicht erwartet, dass Fluiddrücke im Bereich des lithostatischen Druckes auftreten, die zu einer druckgetriebenen Infiltration von Fluiden in das Salzgestein führen.

Für die CASTOR-Behälter ist aufgrund ihres Materials, der Wandstärke und der begrenzten Lösungsmengen ein Versagen alleine durch flächenhafte Korrosion für das Referenzszenarium nicht zu erwarten. Lokale Korrosionseffekte (Lochfraßkorrosion) müssen berücksichtigt werden, da sie eventuell auch bei geringen Feuchtemengen zu einer vollständigen Durchdringung der Wandstärke einiger Behälter führen können.

Obwohl die Behälter eine zu gewährleistende Funktionsdauer von 500 Jahre haben, muss bei allen Fertigungs- und Prüfverfahren eine geringe Fehlerquote unterstellt werden. Für das Referenzszenarium wird in Anlehnung an Untersuchungen in anderen Endlagerprojekten eine Fehlerquote von 0,1 % angenommen. Daher ist bei Berücksichtigung der eingelagerten Behälterzahl von 1.097 CASTOR-Behältern für Leistungsreaktor-Brennelemente und ca. 511 CASTOR-Behältern für Forschungsreaktor-Brennelemente die Einlagerung von bis zu zwei CASTOR-Behältern für Leistungsreaktor-Brennelemente und eines CASTOR-Behälters für Forschungsreaktor-Brennelemente mit Fertigungsfehler zu unterstellen.

Die Entwicklung des geochemischen Milieus entspricht weitgehend der Variante AB1. Abweichungen ergeben sich durch die anderen Behältermaterialien, die Verfüllung des Behälterschachtes mit Magnetit oder abgereichertem  $U_3O_8$  sowie durch die Einlagerungsschienen aus Bronze mit Grafitelementen.

### 5.3.2 Teilsystem „Strecken und Schächte“

Während die Grubenraumkonfiguration der Einlagerungsbereiche varianten-spezifisch ist, wird das aufzufahrende Hohlraumvolumen der Einlagerungsbereiche und Richtstrecken für die Variante B2 ähnlich groß sein wie in der Variante B1. Dies ist z. B. wichtig im Hinblick auf die mit dem Salzgrus eingebrachten Lösungsmengen. Infrastrukturbereich und Schächte sowie das Verfüll- und Verschlusskonzept (mit Ausnahme der Bohrlochverfüllung) sind identisch mit der Variante B1. Daher wird davon ausgegangen, dass viele Prozesse in diesem Teilsystem weitgehend denen für die Variante B1 entsprechen werden.

In Tab. 5.9 sind die Initial-FEP zusammengestellt, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu betrachten sind.

Unterschiede werden sich im Hinblick auf die Temperaturentwicklung und die Spannungsverhältnisse im Gebirge ergeben. Hieraus können Auswirkungen auf die Konvergenzraten und den Fluiddruck sowie auf die Ausprägung und Entwicklung der Auflockerungszone abgeleitet werden. Da die Salzgruskompaktion von der Konvergenz abhängt, wird sie auch anders ausgeprägt sein. Durch die andere Einbringung der Wärmequellen kann sich auch eine Beeinflussung anderer Grubenraumbereiche durch die thermochemische Sulfatreduktion ergeben. Alle anderen im Referenzszenarium R1 genannten Prozesse werden in ähnlicher Weise auch im Referenzszenarium R2 ablaufen.

**Tab. 5.9** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	SchV, StrV	X		
Diapirismus	SchV, StrV	X		
Glaziale Rinnenbildung	SchV			X
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV	X		
<u>Konvergenz</u>	SchV, StrV	X		
<u>Fluiddruck</u>	SchV, StrV	X		
<u>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien</u>	SchV, StrV	X		
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV	X		
Quellen des Bentonits	SchV	X		
Auflösung und Ausfällung	SchV, StrV	X		
Metallkorrosion		X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV	X		
<u>Auflockerungszone</u>	SchV, StrV		X	
<u>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</u>	SchV, StrV	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
<u>Thermochemische Sulfat-reduktion</u>			X	

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Strecken und Schächte“: SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“

### 5.3.3 Teilsystem „Wirtsgestein“

Von den wahrscheinlichen FEP mit einer direkten Beeinträchtigung einer einschlusswirksamen Barriere, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Wirtsgestein“ zu betrachten sind, werden nur die FEP *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* und *Thermochemische Sulfat-reduktion* und *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien* durch die geänderte Endlagerkonfiguration direkt betroffen sein (Tab. 5.10).

**Tab. 5.10** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	Keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	WG	X		
Diapirismus	WG	X		
Subrosion	WG	X		
Bildung kryogener Klüfte	WG			X
Glaziale Rinnenbildung	WG			X
Konvergenz		X		
Fluiddruck	WG	X		
<u>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien</u>	WG	X		
Auflösung und Ausfällung	WG	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	WG	X		
<u>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</u>	WG	X		
Fluidvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
<u>Thermochemische Sulfat-reduktion</u>	WG		X	
Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	WG	X		

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Wirtsgestein“: WG „Wirtsgestein“

Die abweichende Anordnung der Abfallbinde wird zu einem anderen Temperaturfeld als bei der Endlagervariante B1 führen. Dies beeinflusst die Expansion und Kontraktion des Salzgesteins. Die resultierenden Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein sind für die Konvergenz der Grubenräume wichtig. Darüber hinaus können die thermomechanischen Spannungen zu Rissen im Wirtsgestein führen.

Die thermochemische Sulfatreduktion wirkt aufgrund der gegenüber der Variante B1 veränderten Temperaturverteilung in anderen Bereichen des Wirtsgesteins. Die damit

verknüpfte Volumenzunahme beeinflusst das Wirtsgestein (FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*).

Alle anderen Prozesse werden in gleicher Weise wie in der Variante B1 ablaufen.

### 5.3.4 Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“

Die einzigen Teile des Endlagerbergwerks, die das Deck- und Nebengebirge direkt betreffen, sind die Schächte. Diese sind gegenüber der Variante B1 unverändert. Daher werden alle Prozesse in diesem Teilsystem in gleicher Weise ablaufen wie im Referenzszenarium für die Variante B1 (Tab. 5.11). Zu prüfen ist, ob das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ durch die wärmebedingte Hebung des Salzspiegels möglicherweise stärker oder schwächer als in der Variante B1 beeinflusst wird.

**Tab. 5.11** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP

FEP-Titel	* Beeinträchtigung	Keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Fluiddruck	SchV	X		
Subrosion		X		
Glaziale Rinnenbildung				X

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“: SchV „Schachtverschluss“

### 5.3.5 Radionuklidmobilisierung

Die Tab. 5.12 enthält die FEP, die für das FEP *Radionuklidmobilisierung* beeinflussend bzw. auslösend sind. Es zeigt sich, dass einige FEP im Vergleich zur Variante B1 eine abweichende Ausprägung haben werden.

**Tab. 5.12** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Radionuklidmobilisierung* (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

FEP-Titel	Keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Inventar: Radionuklide	X		
<u>Lösungen im Grubenbau</u>	X		
<u>Geochemisches Milieu im Grubenbau</u>	X		
<u>Versagen eines Brennelement-Behälters</u>	X		
Korrosion der Brennstoffmatrix	X		
Korrosion von Glas	X		
<u>Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters</u>	X		
<u>Metallkorrosion</u>	X		
<u>Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme</u>	X		
<u>Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen</u>	X		
Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails	X		
<u>Zersetzung von Organika</u>	X		
<u>Komplexbildung</u>	X		

Eine wesentliche Voraussetzung für die Radionuklidmobilisierung sind die Lösungen im Grubenbau. Es handelt sich um Restfeuchte in den CASTOR-Behältern (siehe /WOL 12b/ und Anhang A) sowie die Gebirgsfeuchte von 0,012 bis 0,017 Gew.-% im Salzgrusversatz und im umgebenen Salzgebirge. Weiteres Wasser kann durch die thermochemische (thermische Phase) oder bakterielle Sulfatreduktion (nach der thermischen Phase) gebildet werden. Im Nahfeld der wärmeentwickelnden Abfälle ist die Möglichkeit der Migration von Lösungseinschlüssen zur Wärmequelle zu berücksichtigen.

Abweichungen des geochemischen Milieus ergeben sich durch andere Materialien für die Behälter, die Verfüllung des Behälterschachtes sowie die Einlagerungsschienen.

Es ist nicht auszuschließen, dass aufgrund von Fertigungs- und Prüffehlern bei der Einlagerung bereits drei CASTOR-Behälter für Leistungsreaktor-Brennelemente und

ein CASTOR für Forschungsreaktor-Brennelemente Fertigungsfehler aufweisen. Für die spätere Nachverschlussphase ist ein sukzessiver Ausfall weiterer Behälter nicht auszuschließen. Bei einem Versagen eines Brennelemente-Behälters werden vorhandene gasförmige Radionuklide mobilisiert. In Kontakt mit Lösungen können weitere gasförmige Radionuklide mobilisiert werden und es ist eine Mobilisierung von Radionukliden aus der Brennstoffmatrix in die flüssige Phase zu betrachten.

Bei den Wiederaufarbeitungsabfällen müssen vor einer Radionuklidmobilisierung sowohl der TLB als auch die Edelstahlkokille im Inneren zerstört werden bevor durch die Korrosion der Glasmatrix Radionuklide freigesetzt werden können.

Die Metallkorrosion betrifft außer den Brennelement-Behältern auch die TLB für Wiederaufarbeitungsabfälle. Bei der Korrosion aktivierter Metallteile können auch Radionuklide in die Gasphase mobilisiert werden.

Eine Materialversprödung der Zirkalloy-Hüllrohre der Brennelemente durch Wasserstoffaufnahme kann die Mobilisierung von Aktivierungsprodukten aus den Hüllrohren beeinflussen.

Die Zersetzung von Organika betrifft die Polyethylen-Abschirmungen der TLB. Die entsprechenden Mengen sind wesentlich geringer als in der Variante B1. Sofern es zu einer strahlungsbedingten Aktivierung des Polyethylens gekommen ist, werden bei ihrer Zersetzung Radionuklide mobilisiert.

### **5.3.6 Radionuklidtransport**

Die Mobilisierung als wesentliche Voraussetzung für den Transport wurde bereits im vorangegangenen Kapitel detailliert beschrieben.

Aufgrund der Einlagerungskonfiguration werden die TLB in der Endlagervariante B2 rasch durch den Versatz und die Gebirgskonvergenz eingeschlossen. Die Salzgruskompanktion kann durch die freigesetzten Fluide (vor allem Korrosionsgase) aus den Einlagerungsbohrlöchern behindert werden. Die Lösungsmengen sind, abgesehen von der leicht erhöhten Restfeuchte in den Behältern, identisch mit dem Referenzszenarium R1. Sorption und Desorption sowie Komplexbildung sind analog zum Referenzszenarium R1 zu berücksichtigen.

### **5.3.7 Zeitliche Entwicklung von Prozessen**

Die vorangegangenen Ausführungen zum Referenzszenarium R2 haben keinen Einfluss auf die in Kapitel 5.2.7 dargestellte tendenzielle Einschätzung der zeitlichen Entwicklung von Aspekten. Das heißt, die in Kapitel 5.2.7 beschriebenen Einschätzungen gelten auch für das hier beschriebene Referenzszenarium R2.

## **5.4 Referenzszenarium R3 zur Einlagerungsvariante AC**

Die folgende Beschreibung des Referenzszenariums R3 für die Einlagerungsvariante AC (Bohrlochlagerung) erfolgt als Differenzbetrachtung zur ausführlichen Beschreibung der Einlagerungsvariante AB1 (siehe hierzu Kapitel 3.1.5 und 4.2.1). Die methodische Vorgehensweise ist dabei beibehalten worden. Die Entwicklung des Endlagersystems wird aus denselben Initial-FEP abgeleitet, die bereits für die Einlagerungsvariante AB1 identifiziert wurden. Aufgrund der abweichenden Einlagerungsvariante und der veränderten räumlichen Anordnung der Abfallbinde ergeben sich z. T. andere Ausprägungen und Wechselwirkungen zwischen den FEP. Auf der 2. Ebene der FEP-Abhängigkeiten werden z. T. auch andere FEP angesprochen (z. B. FEP *Bohrlochverrohrung*).

Beibehalten wird auch die Aufteilung der Beschreibung des Endlagersystems entsprechend den vier im FEP-Katalog ausgewiesenen Endlagerteilsystemen „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ sowie „Deck- und Nebengebirge“. Die Eigenschaften der anderen Teilsysteme und die meisten in ihnen ablaufenden Prozesse werden durch weitreichende Prozesse (z. B. thermomechanische Einwirkungen) beeinflusst. Unverändert sind geologische Prozesse (z. B. Diapirismus) oder Klimaentwicklungen, die daher auch nicht erneut beschrieben werden. Das Verfüll- und Verschlusskonzept sowie die Einlagerung der Abfälle im Westflügel des Endlagers (Variante A) entsprechen – abgesehen von der Verfüllung der verrohrten Bohrlöcher und dem Bohrlochpfropfen – der Einlagerungsvariante AB1. Aus diesem Grund wird die Variante A nicht erneut beschrieben und die folgenden Ausführungen beziehen sich nur noch auf die Variante C aus der Kombination der Einlagerungsvariante AC.

#### 5.4.1 Teilsystem „Nahfeld“

Die Tab. 5.13 enthält die Initial-FEP, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Nahfeld“ zu betrachten sind. FEP, deren Ausprägung infolge der Bohrlochlagerung von der Variante B1 abweicht, sind hervorgehoben dargestellt.

Mit der Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher kommt es zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge, die an der Hohlraumkontur zu Gebirgsverformungen (Konvergenz) führen. Die Einlagerungskonzeption sieht vor, die Behälter (z. B. BSK) mit Brennelementen oder Wiederaufarbeitungsabfällen erst dann einzulagern, wenn das Gebirge durch die Konvergenz auf die Bohrlochverrohrung aufgelaufen ist.

Durch die Wärmeentwicklung der eingelagerten Abfälle wirken sich auch thermische Einflüsse über die Expansion oder Kontraktion auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus, die zu Auflockerungen führen können.

Die Verfüllung der Hohlräume zwischen Abfallbehältern und Bohrlochverrohrung mit Quarzsand begünstigt einerseits, im Vergleich zum unverfüllten Bohrloch, die Ableitung der Zerfallswärme aus den Abfällen und stellt andererseits die in /BMU 10/ geforderte Rückholbarkeit in der Betriebsphase und die Bergung der Behälter in den ersten 500 Jahren in der Nachverschlussphase sicher. Die Einbringung der Abfälle in 300 m tiefen Einlagerungsbohrlöchern führt zu einer gegenüber der Variante B1 anderen räumlichen Temperaturverteilung im Endlagerbereich. Hieraus ergeben sich auch abweichende thermomechanische Spannungsverhältnisse im Gebirge. Sobald die Temperatur wieder abklingt, kommt es zur Gebirgskontraktion und erneut zu Spannungsänderungen.

Bei der Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher werden die Spannungsverhältnisse im angrenzenden Gebirge soweit geändert, dass sich nach Überschreiten der Dilatanzgrenze eine Auflockerungszone an der Bohrlochkontur ausbildet. Als potenzieller Fließweg ist die Auflockerungszone von sicherheitstechnischer Bedeutung. Eine hydraulisch wirksame Auflockerungszone ist nur in der frühen Nachverschlussphase zu erwarten, da sich durch die Wechselwirkung zwischen dem durch die Bohrlochverrohrung gebildeten Stützdruck und dem Salzkriechen die Risse in der Auflockerungszone verschließen und auch verheilen können. Voraussetzung ist, dass Fluide, die in den Restriessen eingeschlossen sind, entweichen können. Sobald sich das Gebirge nach

der thermischen Phase wieder abkühlt, kann es infolge der Gesteinskontraktion ggf. zu Zugspannungen kommen.

**Tab. 5.13** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
<u>Diapirismus</u>		X		
<u>Versagen eines Brennelement-Behälters</u>	BEB	X		
<u>Konvergenz</u>		X		
<u>Fluiddruck</u>		X		
<u>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien</u>		X		
Auflösung und Ausfällung		X		
<u>Metallkorrosion</u>	BEB	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
<u>Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme</u>	BEB	X		
<u>Auflockerungszone</u>			X	
<u>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</u>	BEB	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
<u>Thermochemische Sulfat-reduktion</u>			X	

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Nahfeld“: BEB „Brennelement-Behälter“

Die Fließgeschwindigkeiten (Diapirismus) betragen im Hauptsalz der Staßfurt-Folge ca. 0,07 mm/Jahr (das heißt 70 m im Nachweiszeitraum von einer Million Jahre), die möglicherweise langfristig zu Deformationen und Brüchen der Bohrlochverrohrungen und der eingelagerten Behälter führen können.

Ohne den Zutritt zusätzlicher Lösungsmengen über die Schacht- und Streckenverschlüsse ist im Referenzszenarium im Nahfeld nur von begrenzten Lösungsmengen

auszugehen (Gebirgsfeuchte, Versatzfeuchte, Lösungen aus der thermochemischen Sulfatreduktion). Geringe Restfeuchtemengen können in den Brennelement-Behältern (siehe /WOL 12b/ und Anhang A) und in der Sandverfüllung (0,2 Gew.-%) vorhanden sein. Zu berücksichtigen ist die Möglichkeit der Migration von Lösungseinschlüssen zu den wärmeentwickelnden Abfallgebänden (Thermomigration).

Die Sandverfüllungen der Bohrlochverrohrungen sind nur begrenzt kompaktierbar und werden dauerhaft Bereiche mit hoher Porosität und Permeabilität aufweisen. Sie stellen somit Speichervolumina für Lösungen und Gase dar.

Zu betrachten sind die Auswirkungen der Reaktionsprodukte Wasser (Erhöhung der Fluidmengen) und Schwefelwasserstoff (Einfluss von Sulfid auf die Korrosion von Metallen) auf die Prozesse im Nahfeld sowie eine Volumenänderung des Wirtsgesteins. Weiterhin können durch die thermochemische Sulfatreduktion organische Säuren (Komplexbildner) entstehen.

Die mögliche Feuchtigkeit in der Sandverfüllung der Bohrlochverrohrung wird während der thermischen Phase verdampfen, kann jedoch bei einer dichten Bohrlochverrohrung nicht entweichen und zur Korrosion beitragen.

Bei nicht lösungsgesättigten Bedingungen entspricht der Fluiddruck im Nahfeld dem Gasdruck der eingeschlossenen Luft und der gebildeten Gase (vor allem Korrosionsgase).

Die vorhandenen Lösungsmengen werden zu einer Metallkorrosion der Bohrlochverrohrung (von innen und von außen) und der Endlagerbehälter (ebenfalls von innen und von außen) führen. Der dabei gebildete Wasserstoff kann zu einer Druckerhöhung innerhalb der Bohrlochverrohrung bzw. in den Behältern führen. Durch die Gasbildung infolge der Außenkorrosion der Bohrlochverrohrung kann der Fluiddruck in der Auflockerungszone erhöht werden. Dies kann Auswirkungen auf das Verschließen der Risse in der Auflockerungszone haben. Die Gasbildung durch Metallkorrosion wird dabei durch die verfügbaren Lösungsmengen begrenzt. Falls Fluiddrücke im Bereich des lithostatischen Druckes auftreten, ist eine Gasinfiltration ins Wirtsgestein zu betrachten.

Weitere gasbildende Prozesse im Nahfeld sind die Zersetzung von Organika (Polyethylen-Abschirmung von Behältern), mikrobielle Prozesse und die Radiolyse der Feuchtigkeit in der Sandverfüllung. Da die Kaskillen nur im Kopfbereich abgeschirmt sind, sind

die vorhandenen Mengen an Polyethylen und die resultierenden Gasmengen in der Variante C deutlich geringer als in der Variante B1. Die geringere Abschirmung der Behälter kann zu einer stärkeren Radiolyse führen.

Für die BSK und Triple-Packs ist aufgrund ihres Materials (Feinkornbaustahl), der Wandstärke und der begrenzten Lösungsmengen ein Versagen eines Endlagerbehälters alleine durch flächenhafte Korrosion für das Referenzszenarium nicht zu erwarten. Lokale Korrosionseffekte müssen berücksichtigt werden, da sie eventuell auch bei geringen Feuchtemengen zu einer vollständigen Durchdringung der Wandstärke einiger Behälter führen können. Durch die Auslegung der Behälter und der Bohrlochverrohrung werden der Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet. Danach muss mit zunehmenden Ausfällen der Bohrlochverrohrung sowie der Behälter gerechnet werden.

Obwohl die Behälter eine gewährleistete Funktionsdauer haben, muss bei allen Fertigungs- und Prüfverfahren eine geringe Fehlerquote unterstellt werden. Für das Referenzszenarium wird in Anlehnung an Untersuchungen in anderen Endlagerprojekten eine Fehlerquote von 0,1 % angenommen. Daher ist bei Berücksichtigung der eingelagerten Behälterzahl von ca. 7.068 BSK mit Leistungsreaktor-Brennelementen, 290 BSK mit Forschungsreaktor-Brennelementen die Einlagerung von bis zu elf BSK mit Leistungsreaktor-Brennelementen und einer BSK mit Forschungsreaktor-Brennelementen mit Fertigungsfehlern zu unterstellen.

Für die Variante C sind im Zuge der Erstellung von 221 Einlagerungsbohrlöchern ca. 33.150 Verrohrungsabschnitte (Segmente) einzubringen. Die mechanische Auslegung der Verrohrung und die spätere Fertigung werden zur Gewährleistung der Standicherheit nach den Anforderungen des EUROCODE (DIN EN 1990: 2000) /CEN 02/ erfolgen. Daher ist im Hinblick auf diese Komponenteneigenschaft eine Ausfallquote von 0,01 % zu unterstellen, so dass der mechanische Ausfall von bis zu sechs Segmenten als wahrscheinlich anzusehen ist (Anhang A). Da die Bohrlochverrohrung eine mechanische Schutzfunktion für die BSK hat, kann ihr Ausfall dazu führen, dass die BSK im Inneren der Verrohrung in ihrer Integrität beeinträchtigt werden.

Da eine Metallkorrosion stattfinden wird, ist auch eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme zu erwarten. Diese Materialversprödung kann zu einer Beeinträchtigung der Eigenschaften der Behälter oder der Verrohrung führen. Es wird erwartet,

dass eine Versprödung nur oberflächennah stattfindet und die mechanische Integrität der Komponenten nicht beeinträchtigt.

Entsprechend den geringen Lösungsmengen wird nur eine geringe Korrosion des Sorelbetons der Bohrlochverschlusspfropfen erwartet. Das geochemische Milieu kann durch die Metallkorrosion, die Sandverfüllung, die thermochemische Sulfatreduktion und  $MgCl_2$ -haltige Lösung verändert werden.

#### **5.4.2 Teilsystem „Strecken und Schächte“**

Bezogen auf das Teilsystem „Strecken und Schächte“ ergeben sich Unterschiede zur Variante B1 durch das wesentlich kleinere Streckennetz mit den drei Einlagerungsfeldern und 19 Zugangsstrecken. Infrastrukturbereich und Schächte sowie das Verfüll- und Verschlusskonzept (mit Ausnahme der Bohrlochverfüllung) sind identisch mit der Variante B1. Daher wird davon ausgegangen, dass viele Prozesse in diesem Teilsystem denen der Variante B1 entsprechen werden. Unterschiede werden sich bezüglich der Temperaturentwicklung und der Spannungsverhältnisse im Gebirge sowie deren Auswirkungen auf andere Prozesse ergeben.

In Tab. 5.14 sind die Initial-FEP zusammengestellt, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu betrachten sind.

Das kleinere Streckennetz der Variante C hat zur Folge, dass geringere Lösungsmengen mit dem angefeuchteten Salzgrus eingebracht werden. Die Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbohrlöchern werden durch Dichtpfropfen aus Sorelbeton verschlossen, um eine Feuchtemigration aus dem angefeuchteten Salzgrus in den trockenen Salzgrus der Zugangsstrecke zu behindern. Die Sorelbetonpfropfen der Bohrlöcher haben keine langzeitsicherheitsrelevante Barrierenfunktion. Sie werden aber das geochemische Milieu der sie durchdringenden Lösungen in positiver Weise (Pufferung im basischen Bereich) beeinflussen.

Die Temperaturentwicklung im Salzstock wird aufgrund der durch die Variante C vorgegebenen Anordnung der Behälter mit den wärmeentwickelnden Abfällen in verrohrten Einlagerungsbohrlöchern im Vergleich zur Variante B1 abweichen. Damit wird auch die Spannungsverteilung im Gebirge sowie im Umfeld der Einlagerungsfelder von der Variante B1 abweichen, was wiederum Auswirkungen auf die Konvergenzraten an der

Streckenkontur und die Salzgruskompaktion hat. Mit der Konvergenz sind weitere Prozesse wie die Rissrückbildung und Rissverheilung in der Auflockerungszone versetzter Strecken verknüpft.

**Tab. 5.14** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	SchV, StrV	X		
Diapirismus	SchV, StrV	X		
Glaziale Rinnenbildung	SchV			X
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV	X		
<u>Konvergenz</u>	SchV, StrV	X		
<u>Fluiddruck</u>	SchV, StrV	X		
<u>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien</u>	SchV, StrV	X		
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV	X		
Quellen des Bentonits	SchV	X		
Auflösung und Ausfällung	SchV, StrV	X		
Metallkorrosion		X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV	X		
<u>Auflockerungszone</u>	SchV, StrV		X	
<u>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</u>	SchV, StrV	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
<u>Thermochemische Sulfat-reduktion</u>			X	

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Strecken und Schächte“: SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“

Durch die Wechselwirkung zwischen den Prozessen Konvergenz und Stützwirkung des Salzgrusversatzes wird auch der Fluiddruck im Grubengebäude bestimmt. Dieser ist u. a. auslegungsbestimmend für die Strecken- und Schachtverschlüsse.

Die erforderlichen Temperaturen für das Auftreten der thermochemischen Sulfatreduktion werden nur für wenige tausend Jahre im Umfeld der Einlagerungsbohrlöcher auftreten, so dass dieser Prozess eine zeitlich begrenzte Bedeutung für die Systementwicklung haben wird. Möglicherweise kann es in den kühleren Strecken aber zu einer mikrobiellen Sulfatreduktion kommen, die ebenfalls zu einer Freisetzung von Wasser führen kann.

#### **5.4.3 Teilsystem „Wirtsgestein“**

Von den wahrscheinlichen FEP mit einer direkten Beeinträchtigung einer Initial-Barriere, die gemäß FEP-Katalog im Teilsystem „Wirtsgestein“ zu betrachten sind, werden nur die FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*, *Thermochemische Sulfatreduktion* und *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien* durch die geänderte Endlagerkonfiguration direkt betroffen sein (Tab. 5.15).

Die mit der Variante C vorgegebene Anordnung der Behälter mit den wärmeentwickelnden Abfällen in verrohrten Einlagerungsbohrlöchern führt im Vergleich zur Variante B1 zu einer anderen Temperaturentwicklung und entsprechenden Expansion und Kontraktion des Salzgesteins. Die resultierenden Spannungsänderungen im Wirtsgestein beeinflussen die Konvergenz der Grubenräume. Darüber hinaus können die thermomechanischen Spannungen zu Rissen im Wirtsgestein führen.

Die thermochemische Sulfatreduktion wirkt aufgrund der gegenüber der Variante B1 veränderten Temperaturverteilung in anderen Bereichen des Wirtsgesteins. Eine möglicherweise aus der thermochemischen Sulfatreduktion resultierende Volumenzunahme durch Karbonatbildung (nicht thermisch induzierte Volumenänderung) ist zu berücksichtigen. Die entsprechende Erwärmung des Carnallitits ist sicherheitstechnisch nicht relevant, da im Gebirge eingespannter Carnallitit erst bei Temperaturen über 167 °C Kristallwasser abgibt.

Alle anderen Prozesse werden in gleicher Weise wie in der Variante B1 ablaufen.

**Tab. 5.15** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	WG	X		
Diapirismus	WG	X		
Subrosion	WG	X		
Bildung kryogener Klüfte	WG			X
Glaziale Rinnenbildung	WG			X
Konvergenz		X		
Fluiddruck	WG	X		
<u>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien</u>	WG	X		
Auflösung und Ausfällung	WG	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	WG	X		
<u>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</u>	WG	X		
Fluidvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
<u>Thermochemische Sulfatreduktion</u>	WG		X	
Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	WG	X		

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Wirtsgestein“: WG „Wirtsgestein“

#### 5.4.4 Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“

Da die Schächte gegenüber der Variante B1 unverändert bleiben, werden alle Prozesse in diesem Teilsystem in gleicher Weise ablaufen wie im Referenzszenarium für die Variante B1 (Tab. 5.16). Hierbei kann das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ durch

die wärmebedingte Hebung des Salzspiegels möglicherweise stärker oder schwächer als in der Variante B1 beeinflusst sein.

**Tab. 5.16** Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP

FEP-Titel	Beeinträchtigung*	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Fluiddruck	SchV	X		
Subrosion		X		
Glaziale Rinnenbildung				X

\* Initial-Barriere im Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“: SchV „Schachtverschluss“

#### 5.4.5 Radionuklidmobilisierung

Die Tab. 5.17 enthält die FEP, die für das FEP *Radionuklidmobilisierung* beeinflussend bzw. auslösend sind. Es zeigt sich, dass die meisten FEP im Vergleich zur Variante B1 eine abweichende Ausprägung haben.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Radionuklidmobilisierung sind die Lösungen im Grubenbau. Es handelt sich um Restfeuchte in den BSK (WOL 12b/ und Anhang A), die Restfeuchte des Verfüllsandes (ca. 0,2 Gew.-%) in den Bohrlochverrohrungen und die geringe Gebirgsfeuchte (0,012 bis 0,017 Gew.-%). Außerdem sind die Thermomigration sowie die thermochemische und die mikrobielle Sulfatreduktion sowie ein Wasserverbrauch durch chemische Prozesse zu berücksichtigen. Entsprechend dem kleineren Grubengebäude werden in der Variante C geringere Feuchtemengen mit dem Salzgrusversatz in die Richtstrecken eingebracht als in der Variante B1. Unter gegebenen Randbedingungen kann ein Zutritt von Lösungen ins Bohrloch erfolgen.

**Tab. 5.17** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Radionuklidmobilisierung* (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

FEP-Titel	Keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Inventar: Radionuklide	X		
<u>Lösungen im Grubenbau</u>	X		
<u>Geochemisches Milieu im Grubenbau</u>	X		
<u>Versagen eines Brennelement-Behälters</u>	X		
Korrosion der Brennstoffmatrix	X		
Korrosion von Glas	X		
<u>Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters</u>	X		
<u>Metallkorrosion</u>	X		
<u>Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme</u>	X		
<u>Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen</u>	X		
Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails	X		
<u>Zersetzung von Organika</u>	X		
Komplexbildung	X		

Das geochemische Milieu im Umfeld der Endlagerbehälter wird durch den Quarzsand beeinflusst.

Aus Brennelement-Behältern mit Fertigungsfehler können bereits kurz nach der Einlagerung volatile Radionuklide freigesetzt werden. Zudem kann durch den vorzeitigen Ausfall der Bohrlochverrohrung die Integrität weiterer Behälter beeinträchtigt werden. Für die spätere Nachverschlussphase nach mehr als 500 Jahren ist ein sukzessiver Ausfall weiterer Behälter nicht auszuschließen. In Kontakt mit Lösungen können weitere gasförmige Radionuklide mobilisiert werden und es ist eine Mobilisierung von Radionukliden aus der Brennstoffmatrix in die flüssige Phase zu betrachten.

Die Metallkorrosion betrifft außer den Brennelement-Behältern auch die Triple-Packs und die Bohrlochverrohrungen. Außerdem werden metallische Abfälle (vor allem kompaktierte Strukturteile der direkt endgelagerten Brennelemente in BSK bzw. Hüllrohre

und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung in Triple-Packs) korrodiert. Bei der Korrosion aktivierter Metallteile können auch Radionuklide in die Gasphase mobilisiert werden.

Weiterhin sind die Mobilisierung von Aktivierungsprodukten aus den Hüllrohren durch eine Materialversprödung der Zirkalloy-Hüllrohre sowie die Zersetzung der Polyethylen-Abschirmungen der Behälter zu berücksichtigen.

#### **5.4.6 Radionuklidtransport**

Unter den beeinflussenden FEP in Tab. 5.18 sind drei FEP, für die gegenüber der Variante B1 eine andere Ausprägung erwartet wird. Die Mobilisierung als wesentliche Voraussetzung für den Transport wurde bereits im vorangegangenen Kapitel detailliert beschrieben.

Durch die Sandverfüllung der Bohrlochverrohrung, die dauerhaft hohe Porositäten und Permeabilitäten aufweist, ist in diesem Bereich ein advektiver Lösungstransport möglich. Da die Funktionsdauer der Bohrlochverrohrung 500 Jahre beträgt und an den Bohrlochpfropfen keine Anforderungen bezüglich der Funktionsdauer bestehen, ist davon auszugehen, dass sich nach 500 Jahren bzw. bei einem vorzeitigen Ausfall der Bohrlochverrohrung auch kurz nach Verschluss des Endlagers durch die Sandverfüllung eine durchgehende Wegsamkeit bis in die Zugangsstrecke ausbilden kann. Die Kompaktion des Salzgrusversatzes kann dabei durch mögliche freigesetzte Fluide aus den Einlagerungsbohrlöchern behindert werden. Ein Antriebsmechanismus für einen advektiven Transport ist ein Druckaufbau aufgrund der Gasbildung durch Metallkorrosion, Zersetzung von Organika und Radiolyse.

Sorption und Desorption beeinflussen den Radionuklidtransport. In dem Zusammenhang ist die Sorption an Korrosionsprodukten der Metalle und des Sorelbetons der Verschlussbauwerke (Bohrlochpfropfen) von Bedeutung. Zur Ermittlung der Sorptionseigenschaften der Sandverfüllung liegen z. Z. keine belastbaren Daten vor. Es wird jedoch vermutet, dass die Sorptionseigenschaften vernachlässigbar sind. Bei der thermochemischen Sulfatreduktion und bei der Radiolyse von Kohlenwasserstoffen im Wirtsgestein können organische Säuren entstehen, die zur Komplexbildung führen.

**Tab. 5.18** Beeinflussende FEP für das FEP *Radionuklidtransport*  
 (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung)

<b>FEP-Titel</b>	<b>keine zeitliche Beschränkung</b>	<b>bis ca. 10.000 a</b>	<b>ab ca. 10.000 a</b>
<u>Radionuklidmobilisierung</u>	X		
Radioaktiver Zerfall	X		
<u>Advektion</u>	X		
Mechanische Dispersion	X		
Diffusion	X		
Matrixdiffusion	X		
<u>Sorption oder Desorption</u>	X		
Auflösung und Ausfällung	X		
Komplexbildung	X		
Kolloide	X		

#### **5.4.7 Zeitliche Entwicklung von Prozessen**

Die vorangegangenen Ausführungen zum Referenzszenarium R3 haben keinen Einfluss auf die in Kapitel 5.2.7 dargestellte tendenzielle Einschätzung der zeitlichen Entwicklung von Aspekten. Das heißt, die in Kapitel 5.2.7 beschriebenen Einschätzungen gelten auch für das hier beschriebene Referenzszenarium R3.



## **6 Alternativszenarien**

Im vorhergehenden Kapitel 5 wurde für die drei Einlagerungsvarianten AB1, AB2 und AC jeweils ein Referenzszenarium abgeleitet und in den Kapiteln 5.2, 5.3 und 5.4 beschrieben. Für jede dieser Einlagerungsvarianten werden im Folgenden Alternativszenarien auf der Basis des jeweiligen Referenzszenariums abgeleitet. Dabei werden für die Einlagerungsvariante AB1 das Vorgehen ausführlich dargestellt und die ermittelten Alternativszenarien ausführlich diskutiert (Kapitel 6.1). Für die beiden anderen Einlagerungsvarianten erfolgt die Darstellung in den Kapiteln 6.2 und 6.3 als Differenzbetrachtung zur Einlagerungsvariante AB1.

Die Alternativszenarien werden für jede Einlagerungsvariante nach der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Vorgehensweise aus vier Ausgangspunkten abgeleitet. Die Alternativszenarien unterscheiden sich nur in einem Aspekt gegenüber dem entsprechenden Referenzszenarium (vgl. auch Kapitel 3.4). So wird hinsichtlich der spezifischen Annahmen zum Referenzszenarium nur zu einer Annahme eine alternative Betrachtung vorgenommen. Analog ist die Vorgehensweise bei den FEP. Entweder wird jeweils zu einem FEP (Initial-FEP bzw. bestimmende FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport) eine weniger wahrscheinliche Ausprägung oder zusätzlich ein weniger wahrscheinliches FEP berücksichtigt. Für jede Einlagerungsvariante werden die aus diesen vier Ausgangspunkten abgeleiteten Szenarien jeweils in einem separaten Unterkapitel dargestellt.

### **6.1 Alternativszenarien zur Einlagerungsvariante AB1**

#### **6.1.1 Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen**

Für die Ableitung von möglichen Alternativszenarien sind folgende Schritte für jede spezifische Annahme durchzuführen:

- In einem ersten Schritt sind relevante Alternativen zur spezifischen Annahme zu bestimmen. Abweichungen können dabei je nach Formulierung der Annahme eine quantitative Angabe einer physikalischen Größe oder eine qualitative Beschreibung sein.

- Der nächste Schritt umfasst die Prüfung, ob die alternative Betrachtung zur spezifischen Annahme durch ein FEP repräsentiert werden kann und welche FEP des FEP-Katalogs unmittelbar betroffen sind oder einen Bezug haben. Die Intention hierbei ist, eine Verknüpfung zu den FEP des FEP-Kataloges herzustellen, die die weitere Diskussion und die Beschreibung der möglicherweise zu betrachtenden alternativen Entwicklung vereinfachen würde.
- In einem abschließenden qualitativen Schritt erfolgt die Einschätzung, welche unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten sich im Vergleich zum Referenzszenarium ergeben können.

Das Vorgehen nach den drei genannten Arbeitsschritten bildet dann die Grundlage zur Ableitung von Alternativszenarien. Im Folgenden werden nach der beschriebenen Vorgehensweise die zu betrachtenden Abweichungen zu den spezifischen Annahmen aufgearbeitet.

In Kapitel 3 wurde bereits ausgeführt, dass es für die Ableitung von Szenarien notwendig ist, zu bestimmten Aspekten Annahmen zu treffen. Bei den Annahmen wird unterschieden zwischen solchen, die einen für die VSG übergeordneten Charakter haben und solchen, die spezifisch für die Ableitung des Referenzszenariums gelten. Wesentlich für die Ableitung von Alternativszenarien sind hierbei die spezifischen Annahmen, die für das Referenzszenarium getroffen wurden (Kapitel 5.1.2).

#### **6.1.1.1 Spezifische Annahme zur Klimaentwicklung**

##### **Spezifische Annahme**

„Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps Elster ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen, die dem Verlauf der bereits auf dem Standort vorliegenden Gorlebener Rinne folgt.“

## **Schritt 1) „Bestimmung möglicher Alternativen“**

Die spezifische Annahme liefert mehrere Ansatzpunkte für eine alternative Betrachtung. Eine Alternative ergibt sich, wenn der regelmäßige Wechsel von Kalt- und Warmzeiten beibehalten und die Zyklusdauer herauf- oder herabgesetzt wird.

Einen weiteren Ansatzpunkt bietet die Einbeziehung verschiedener wechselnder Zyklen innerhalb des Nachweiszeitraumes. Darüber hinaus ist eine weitere Abweichung von der Annahme hinsichtlich der zukünftigen Abfolge möglich. Unter Abfolge ist die auftretende Reihenfolge von Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Saale und Elster, mit denen eine entsprechende Ausprägung der Einwirkungen auf die Standortregion verbunden wird, zu verstehen. So hat insbesondere die Elster-Kaltzeit zu ausgeprägten glazialen Rinnensystemen in Norddeutschland geführt. Auch am Standort Gorleben wurde über dem Salzstock die in nordost-südwestlicher Richtung verlaufende elsterzeitliche Gorlebener Rinne nachgewiesen. Ferner sind in benachbarten Regionen aus der Saale-Kaltzeit glaziale Rinnen bekannt, die jedoch im Vergleich zur Elster-Kaltzeit eine wesentlich geringere Ausprägung aufweisen.

Hieraus ergeben sich folgende grundlegende Ansätze für eine alternative Betrachtung:

- veränderte Zyklusdauer
- verschiedene wechselnde Zyklen
- veränderte Abfolge von Kaltzeittypen
- veränderte Rinnenbildung

Die beiden letztgenannten Ansätze für alternative Betrachtungen werden im Folgenden aufgrund ihrer engen Verknüpfung gemeinsam behandelt.

### **Veränderte Zyklusdauer**

Als Zyklus wird hier die Zeitphase verstanden, die eine Kaltzeit und Warmzeit umfasst. Der für das Referenzszenarium zugrunde gelegte Zyklus von 100.000 Jahre bedeutet, dass entsprechend für den zu betrachtenden Nachweiszeitraum von einer Million Jahre zehn Zyklen mit Kalt- und Warmzeiten auftreten. Die Erdgeschichte zeigt, dass der Zyklus keine über alle Zeiten konstante Größe war. So hat vor etwa 2,7 Millionen Jahren ein Wechsel von astronomischen Zyklen mit der Länge von 19.000 Jahre bis 23.000 Jahre zu 41.000 Jahre stattgefunden. Dieser Zyklus hielt bis ca. 800.000 Jahre

vor heute an, bis sich dann ein erneuter Wechsel von 41.000 Jahre zu 100.000 Jahre vollzogen hatte. Seitdem lässt sich bis in die heutige Zeit ein konstanter Zyklus von 100.000 Jahre aus den Klimadaten ableiten /MRU 11/.

Hieraus wird deutlich, dass für die Zukunft ein erneuter Zykluswechsel nicht auszuschließen ist. Die Zyklusdauer kann grundsätzlich auch niedriger oder auch höher als der zugrunde gelegte Zyklus von 100.000 Jahre sein.

Eine niedrigere Zyklusdauer heißt, dass die Anzahl der Kalt- und Warmzeiten über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zunimmt. Es ist aber auch aufgrund der verkürzten Phase von Kalt- und Warmzeiten zu erwarten, dass deren Ausprägung weniger intensiv im Vergleich zu den vergangenen Kalt- und Warmzeiten bei einem Zyklus von 100.000 Jahre ausfallen. So ist auffällig, dass die Amplituden im Temperaturverlauf, das heißt die Temperaturunterschiede zwischen Glazialen und Interglazialen, vor 800.000 a, also bei einer niedrigeren Zyklusdauer, deutlich geringer ausfallen /KEL 09/.

Es ist bei einer stark verkürzten Phase für den Aufbau eines Gletschers von einer geringeren Eismächtigkeit auszugehen. Darüber hinaus werden die Kaltzeiten eventuell nicht mehr für eine Vergletscherung im Standortbereich ausreichen /MRU 11/. Auch hinsichtlich der Warmzeiten ist zu vermuten, dass die abschmelzenden Eismassen an den Polen geringer ausfallen und damit eine Meeresüberflutung des Standortes ebenso geringmächtiger sein oder ausbleiben wird.

Aufgrund der geringeren Ausprägung der Kalt- und Warmzeiten bei einer niedrigen Zyklusdauer ist dieser Fall mit dem Referenzszenarium abgedeckt und wird daher in einem Alternativszenarium nicht betrachtet.

Eine Zyklusdauer der Kalt- und Warmzeiten von über 100.000 Jahre wurde in den letzten Millionen Jahren nicht beobachtet. Zur Ableitung eines solchen Zyklus fehlt derzeit die wissenschaftliche Basis. Aus diesem Grund wird eine höhere Zyklusdauer nicht in einem Alternativszenarium betrachtet.

## **Verschiedene wechselnde Jahreszyklen**

Für die o. g. Wechsel der Zyklusdauer z. B. von 41.000 Jahre auf 100.000 Jahre vor ca. 800.000 Jahre gibt es bisher keine ausreichende wissenschaftliche Erklärung. Auch das Meinungsbild in der Fachwelt der Paläoklimatologie ist hierzu unterschiedlich. Von einigen Klimaforschern wird der Wechsel in Zusammenhang mit einer langzeitlichen Abnahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre oder kontinentalen Verwitterungsvorgängen gebracht. Ein anderes Meinungsbild geht hinsichtlich der pleistozänen glazialen Variabilität von einem chaotischen Verlauf aus, der sich in einem spontanen Übergang auf eine neue Zyklusdauer äußert /KEL 09/.

Aufgrund der stattgefundenen Übergänge von zyklischen Phasen, die das Klima durch Glaziale und Interglaziale geprägt haben, ist auch zukünftig davon auszugehen, dass sich ein Zykluswechsel einstellt. Hier ist allerdings darauf hinzuweisen, dass der Zyklus von 41.000 Jahre weitaus länger als eine Million Jahre angehalten hat und der 100.000 Jahre-Zyklus bereits 800.000 Jahre anhält. Ein mehrfacher Wechsel im Nachweiszeitraum von einer Million Jahren kann jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden. In einem Alternativszenarium wird ein solcher mehrfacher Wechsel nicht betrachtet, da dadurch keine Beeinflussung des Endlagers resultiert, die nicht schon durch das zugrunde liegende Klimabild abgedeckt ist.

## **Veränderte Abfolge von Kaltzeittypen und veränderte Rinnenbildung**

In der für das Referenzszenarium zugrunde gelegten Klimaentwicklung wird von Kaltzeittypen ausgegangen, die in den letzten ca. 500.000 Jahren aufgetreten sind. Mit den Kaltzeittypen werden, wie bereits erwähnt, bestimmte klimabedingte Einwirkungen auf die Standortregion verbunden. Bei den Kaltzeittypen unterscheidet man für die norddeutsche Region die Weichsel-Kaltzeit, Saale-Kaltzeit und Elster-Kaltzeit. Die Eisrandlage der Weichsel-Kaltzeit ist dabei am wenigsten weit vorgedrungen. Der maximale Vorstoß der Eisrandlagen der beiden anderen Kaltzeittypen liegt auf ähnlichem Niveau.

Während der Elster-Kaltzeit sind in Norddeutschland ausgeprägte Rinnensysteme entstanden. Daher werden mit diesem Kaltzeittyp die intensivsten Auswirkungen verbunden. In Bezug auf die Art der Rinnenausbildung und Rinnengenesse wurde noch keine allgemeingültige Erklärung gefunden. Die Rinnenbildung folgt keinen bevorzugten Pfaden und könnte prinzipiell an jedem Standort in der norddeutschen Region entstehen. Hinsichtlich der Genese von glazialen Rinnen wird in den meisten Erklärungsansätzen

ein wesentlicher Zusammenhang mit den Schmelzwässern, die bei dem Rückzug des Gletschers anfallen, gesehen. Daraus resultiert die Annahme, dass die Rinnenbildungen hauptsächlich in der Endphase einer Kaltzeit auftreten werden. Das bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass bei jedem Auftreten einer zukünftigen Kaltzeit vom Typ Elster erneut eine Rinne am Standort Gorleben generiert wird.

Für das Referenzszenarium wird der Fall betrachtet, dass bei dem ersten Auftreten einer in ihrer Ausprägung an die Elster-Kaltzeit angelehnten Kaltzeit (im Weiteren kurz mit Kaltzeit vom Typ Elster bezeichnet) eine Rinne entsteht (ca. 480.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers), die dem Verlauf der bereits bestehenden Rinne am Standort Gorleben entspricht. Bei dem nächsten Auftreten einer Kaltzeit vom Typ Elster im vorgegebenen Klimabild um ca. 820.000 Jahre bis 1.000.000 Jahre wird im Referenzszenarium eine Rinnenbildung am Standort nicht unterstellt. Hinsichtlich der zu behandelnden Alternativszenarien wird davon abgewichen, um auch weniger wahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeiten in Betracht zu ziehen. Jedoch bleibt selbst unter weniger wahrscheinlichen Erwägungen die Anzahl der glazialen Rinnenbildungen eingeschränkt (s. o.). Das heißt, für die hier zu betrachtende Abweichung von der spezifischen Annahme wird höchstens bei zwei von mehreren möglichen Kaltzeiten vom Typ Elster, die im Nachweiszeitraum auftreten können, eine Rinnenbildung auf dem Salzstock in Betracht gezogen.

Es ist durchaus vorstellbar, dass zukünftig Kaltzeiten auftreten, die eine niedrigere oder auch höhere Intensität als die hier beschriebenen Kaltzeittypen aufweisen. Hinsichtlich der Ableitung solcher anderweitigen Kaltzeiten fehlt jedoch die wissenschaftliche Grundlage. Aus diesem Grund werden nur die benannten Kaltzeittypen für eine alternative Betrachtung der spezifischen Annahme als potenzielle Basis für Kaltzeiten herangezogen. Die Einbeziehung veränderter Intensitäten erfolgt entweder unter Berücksichtigung von FEP, die durch die entsprechende Kaltzeit ausgelöst bzw. beeinflusst werden, oder in den Alternativszenarien aus Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen.

Unter Einbeziehung der mit den Kaltzeittypen verbundenen Intensitäten, der bei weniger wahrscheinlichen Betrachtungen auftretenden erneuten Rinnenbildung für zwei Kaltzeiten vom Typ Elster im Nachweiszeitraum, und dem vorhergesagten Auftreten des nächsten Hochglazials in ca. 50.000 Jahren ist die Einflussnahme der Abfolge von Kaltzeiten aufgrund der Tiefenlage des Endlagers vernachlässigbar.

Aus diesem Grund wird für die weitere alternative Betrachtung der spezifischen Annahme die gleiche Abfolge von Kaltzeiten, wie im vorgegebenen Klimabild des Referenzszenariums, gewählt.

## **Schritt 2) „Bezug zu den FEP des FEP-Kataloges“**

Die mit der Annahme verbundene Klimaentwicklung hat einen direkten Bezug zu einigen FEP des FEP-Kataloges. Hierbei sind insbesondere die folgenden FEP zu nennen:

- *Erosion*
- *Sedimentation*
- *Subrosion (Initial FEP)*
- *Globale klimatische Veränderungen*
- *Transgression oder Regression*
- *Permafrost*
- *Bildung kryogener Klüfte (Initial FEP)*
- *Inlandvereisung in randlicher Lage*
- *Vollständige Inlandvereisung*
- *Glaziale Rinnenbildung (Initial FEP)*

Das heißt, dass diese FEP wahrscheinlich sind und die Funktion von Initial-Barrieren direkt beeinträchtigen können. Eine direkte Beeinträchtigung der Initial-Barriere „Wirtsgestein“ ist durch die genannten Initial-FEP gegeben, wobei die Subrosion und die glaziale Rinnenbildung auch noch auf die Initial-Barriere „Schachtverschluss“ Einfluss nehmen können.

Die in der Klimaentwicklung auftretenden Kalt- und Warmzeiten werden durch das o. g. FEP *Globale klimatische Veränderungen* initiiert. Solche globalen Veränderungen werden wiederum von z. T. extraterrestrischen Mechanismen ausgelöst, die in Bezug auf den Zusammenhang und das Einflussvermögen auf das Klimabild noch nicht umfassend verstanden sind.

Die obige Zusammenstellung der bezugnehmenden FEP zur spezifischen Annahme lässt erkennen, dass der mit der Klimaentwicklung verbundene Wechsel von Kalt- und Warmzeiten am Standort Gorleben zahlreiche Prozesse initiiert bzw. ablaufende Prozesse beeinflusst. Die Beschreibung dieser Vorgänge erfolgt in detaillierter Weise in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose /MRU 11/ unter Einbeziehung der identifizierten Initial-FEP im Referenzszenarium. Darin sind ebenfalls deren Abhängigkeiten zu auslösenden und beeinflussenden FEP detailliert erläutert. Darüber hinaus sind weitere Informationen dem FEP-Katalog zu entnehmen. Abweichungen zu diesen Entwicklungen, die sich unter Berücksichtigung von weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP ergeben können, werden ebenfalls untersucht und beschrieben. Aus diesem Grund wird auf eine ausführliche Darstellung der aus den Kalt- und Warmzeiten resultierenden Prozesse an dieser Stelle verzichtet.

### **Schritt 3) „Potenzieller Unterschied zum Referenzszenarium“**

In diesem Schritt werden die aus den vorangegangenen Schritten dargestellten Inhalte hinsichtlich möglicher unterschiedlicher Entwicklungen im Vergleich zum Referenzszenarium in konzentrierter Weise gegenübergestellt und beschrieben.

Die für eine Gegenüberstellung zum Referenzszenarium wesentlichen Informationen aus der alternativen Betrachtung zur spezifischen Annahme sind in der Tab. 6.1 zusammengestellt. Aus der Tab. 6.1 ist zu entnehmen, dass folgende alternative Aspekte in insgesamt fünf Betrachtungsfällen einbezogen worden sind:

- Veränderte Ausprägung hinsichtlich einer möglichen Rinnenbildung,
- Veränderte Abfolge der Kaltzeittypen,
- Veränderte Rinnenbildung und damit mögliche vorauseilende Subrosion und
- Veränderter Zyklus.

Unter Einbeziehung der geführten Diskussion in den vorangegangenen Schritten bleiben aus den dargestellten Betrachtungsfällen zwei Fälle übrig, die im Rahmen der Überlegungen zu möglichen Abweichungen zur spezifischen Annahme in ein entsprechendes Alternativszenarium münden.

**Tab. 6.1** Referenzszenarium und mögliche alternative Betrachtungsfälle von der spez. Annahme (Daten wurden aus dem FEP-Katalog entnommen /WOL 12b/)

Bezug	Wahrscheinlichkeit*	Abfolge Kaltzeiten	Jahreszyklus	Rinnenbildung		Anmerkung
				Verlauf	Erosive Tiefenwirkung	
Referenzszenarium	w.	nach vorgegebenem Klimabild	100.000 a	gemäß Gorlebener Rinne	300 m Lockergestein 50 m Festgestein	Unterschiede beziehen sich auf diesen Fall.
veränderte Ausprägung	w. w.	nach vorgegebenem Klimabild	100.000 a	gemäß Gorlebener Rinne	600 m Lockergestein 50 m Festgestein	Fall wird bereits bei Initial-FEP mit w. w. Ausprägungen behandelt.
veränderte Abfolge	w.	veränderlich (z. B. frühes Auftreten einer Kaltzeit vom Typ Elster)	100.000 a	gemäß Gorlebener Rinne	300 m Lockergestein 50 m Festgestein	Fall wird nicht betrachtet da die Abfolge keinen gravierenden Einfluss hat.
veränderte Rinnenbildung	w. w.	nach vorgegebenem Klimabild	100.000 a	erste Rinne: gemäß Gorlebener Rinne zweite Rinne: außerhalb der Gorlebener Rinne bzw. schneidend oder kreuzend	300 m Lockergestein, 50 m Festgestein (je Rinne)	Ist in einem Alternativszenarium zu betrachten. Vorauseilende Subrosion bei der zweiten Rinne möglich.
veränderte Rinnenbildung und Ausprägung	w. w.	nach vorgegebenem Klimabild	100.000 a	außerhalb der Gorlebener Rinne bzw. schneidend oder kreuzend	600 m Lockergestein, 50 m Festgestein	Ist in einem Alternativszenarium zu betrachten. Vorauseilende Subrosion möglich.
veränderte Zyklendauer	w.	nach vorgegebenem Klimabild + zusätzliche Kalt- u. Warmzeiten	40.000 a	keine Rinnenbildung	nicht zu betrachten	Fall wird repräsentativ durch das Referenzszenarium abgehandelt.

\* w. „wahrscheinlich“, w. w. „weniger wahrscheinlich“

Der erste Fall beinhaltet die Möglichkeit, dass am Standort **Gorleben** auf dem Salzstock bei dem Auftreten zukünftiger Kaltzeiten vom Typ Elster gemäß dem vorgegebenen Klimabild erneut glaziale Rinnenbildungen erfolgen. Im Vergleich zum Referenzszenarium ist hier der potenzielle Unterschied darin zu sehen, dass aufgrund der zweiten nicht kongruent entstehenden Rinne sämtliche Prozesse, die mit der Rinnenbildung zusammenhängen, zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal durchlaufen werden und auf den Standort wirken. Darüber hinaus ist hierbei die selektive Subrosion (vorausseilende Subrosion) zu betrachten.

Bei dem zweiten Fall wird nur eine erneute Rinnenbildung bei dem ersten Auftreten einer Kaltzeit vom Typ Elster berücksichtigt, die jedoch hinsichtlich des Verlaufes nicht der bereits bestehenden Gorlebener Rinne folgt und eine höhere mögliche Tiefenwirkung beinhaltet. Die potenziellen Unterschiede liegen hier im Zusammenspiel des Rinnenverlaufes und deren Ausprägung hinsichtlich der Tiefenwirkung sowie der zu betrachtenden selektiven Subrosion, die möglicherweise einen alternativen Entwicklungsverlauf nach sich ziehen.

In einem anderen Fall wird eine weitere Betrachtung aufgrund des geringen potenziellen Unterschiedes zum Referenzszenarium ausgenommen. Alle anderen in der Tab. 6.1 dargestellten Fälle werden entweder im Referenzszenarium oder Alternativszenarien, resultierend aus der Betrachtung der Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen, repräsentativ behandelt.

### **Alternativszenarien**

Aus der o. g. Darstellung ergeben sich folgende wesentliche Unterschiede zum Referenzszenarium:

#### **Alternativszenarium A1a1**

„Mit dem regelmäßigen Wechsel von Warm- und Kaltzeiten bei einem Jahreszyklus von 100.000 Jahren treten nach dem Klimabild für das Referenzszenarium zwei Kaltzeiten vom Typ Elster auf. Nach ca. 480.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers wird die Gorlebener Rinne in der ersten auftretenden Kaltzeit vom Typ Elster ihrem heutigen Verlauf folgend erneut durch eine glaziale Rinne überfahren. Eine weitere Rinne wird bei dem nächsten Eintreten einer Kaltzeit vom Typ Elster in ca. 970.000 Jahren auf dem Salzstock, jedoch außerhalb der heutigen Gorlebener Rinne, generiert. Die erosiven Tiefenwirkungen beider Rinnen unterliegen dabei den Festigkeitseigen-

schaften und vorliegenden Überdeckungen an Locker- und Festgestein. Die Rinne kann dabei in Abhängigkeit von der Lage des Salzspiegels und der Überdeckung des Lockergesteins maximal 50 m tief in das Salzgestein eindringen.“

### **Alternativszenarium A1a2**

„Bei dem ersten Auftreten einer Kaltzeit vom Typ Elster nach dem vorliegenden Klimabild wird um ca. 480.000 Jahre auf dem Salzstock, außerhalb des heutigen Verlaufes der Gorlebener Rinne, eine weitere glaziale Rinne generiert. Die Ausprägung dieser Rinne orientiert sich an den vorliegenden Überdeckungen an Locker- und Festgestein, wobei in Bezug auf das Lockergestein eine erosive Tiefenwirkung von 600 m und hinsichtlich des Salzgesteins von 50 m möglich sind.“

Neben der Bildung von glazialen Rinnen sind in den Alternativszenarien auch die anderen unter Schritt 2 benannten kaltzeitbedingten Prozesse wie z. B. Permafrost und Subrosion zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist bei einer Generierung von glazialen Rinnen, die außerhalb der bestehenden Gorlebener Rinne verlaufen eine mögliche vorausseilende Subrosion (selektive Ablaugung) zu berücksichtigen. Eine selektive Ablaugung leichtlöslicher Minerale ist dann gegeben, wenn unbeeinflusste Bereiche des überkippten Kaliflözes durch tief reichende Erosion zugänglich für Wasser gemacht würden (vgl. hierzu Kapitel 5.2.3 und Kapitel 6.1.2.5).

Diese o. g. Prozesse werden hier nicht weiter ausgeführt, da deren Abhängigkeiten und Ausprägungen bereits im Referenzszenarium sowie in dem Anhang A detailliert beschrieben sind.

Beide Alternativszenarien werden als weniger wahrscheinliche Entwicklungen betrachtet. Die Gründe sind jedoch unterschiedlich. Bei dem erstgenannten Alternativszenarium wird die Wahrscheinlichkeit aufgrund der Betrachtung, dass im Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zwei glaziale Rinnen genau am gleichen Standort (kein bevorzugtes Gebiet für die Rinnenbildung) generiert werden, für gering erachtet. Weder das vorliegende Gestein noch die bestehende Gorlebener Rinne stellen bevorzugte Merkmale bzw. Eigenschaften für eine erneute Entstehung von Rinnen dar. Hinzu kommt, dass die geologischen Beschaffenheiten in der Gorlebener Rinne und außerhalb davon kaum Unterschiede aufweisen. Die Generierung von glazialen Rinnen kann an beliebigen Orten in der norddeutschen Region erfolgen. Das zweite Alternativszenarium wird

aufgrund der Tiefenwirkung von 600 m für das Lockergestein als gering wahrscheinlich eingestuft.

#### **6.1.1.2 Spezifische Annahme zu Schacht- und Streckenverschlüssen**

##### **Spezifische Annahme**

„Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.“

##### **Schritt 1) „Bestimmung möglicher Alternativen“**

Eine Alternative zur o. g. spezifischen Annahme ist darauf auszurichten, dass die erstellten Schacht- und Streckenverschlüsse nicht den spezifizierten Anforderungen genügen. Das bedeutet, dass diese Verschlussbauwerke eine unzureichende bzw. verminderte Wirkungsweise aufweisen.

Eine verminderte Wirkungsweise kann sich auf unterschiedliche Merkmale der Verschlussbauwerke, wie z. B. den Zeitpunkt der verminderten Wirkungsweise, ihre Durchlässigkeit, eine verkürzte Funktionsdauer oder ähnliches, beziehen. Darüber hinaus können auch die Gründe, die zu einer verminderten Wirkungsweise führen, vielschichtig sein. Beispiele hierfür sind fehlerhafte Konstruktion des technischen Bauwerkes, Verwendung defekter oder ungeeigneter Materialien und Mängel in der Ausführungsplanung.

Bei der Detailplanung und Errichtung der Verschlussbauwerke wird, schon wegen der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, ein umfangreiches QS-Programm zur Anwendung kommen. Für die Bauwerke werden separate Einzelnachweise ihrer Funktionstüchtigkeit zu erbringen sein. Eine Alternative zu der spezifischen Annahme ist daher dem Bereich der weniger wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten zuzuordnen (vgl. hierzu auch Kapitel 4.2.1).

Nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird zu den weniger wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten ausgeführt, dass das gleichzeitige Auftreten mehrerer unabhängiger Fehler nicht zu unterstellen ist. Aus diesem Grund bezieht sich eine alternative Annahme nicht gleichzeitig auf Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse. Für mehrere gleichartige Bauwerke, wie z. B. die Streckenverschlüsse, ist das Auftreten eines systematischen Fehlers nicht auszuschließen. Allerdings wird wegen der

intensiven Qualitätsprüfung ein systematischer Fehler, und damit ein gleichzeitiges Ausfallen mehrerer gleichartiger Verschlussbauwerke, für unwahrscheinlich gehalten und im Rahmen der Szenarienentwicklung nicht betrachtet.

### **Alternative Betrachtung zum Schachtverschluss und Streckenverschluss**

Für die Abweichung von der spezifischen Annahme, das heißt, für die Ableitung der verminderten Wirkungsweise lassen sich folgende Möglichkeiten, z. B. aufgrund technischer, materialspezifischer, planerischer und konstruktiver Mängel, in Betracht ziehen:

- Erhöhte integrale Durchlässigkeit des Verschlussbauwerkes wegen
  - erhöhter Durchlässigkeit der Dichtelemente und/oder,
  - erhöhter Durchlässigkeit im Randbereich (Kontaktzone und Auflockerungszone).
- Wirkungsvermögen setzt erst zu einem späteren Zeitpunkt als vorgesehen ein.
- Verminderte Funktionsdauer der Verschlussbauwerke.

Am Beispiel des Schachtverschlusses wird aus der Abb. 4.4 angesichts der Dimension der Komponenten deutlich, dass lokale Unterschiede hinsichtlich der Materialeigenschaften wie z. B. Porosität und Permeabilität nicht auszuschließen sind. Die Unterschiede sind jedoch dann tolerierbar, wenn die Planungswerte integral eingehalten werden.

Es ist weniger wahrscheinlich, dass die Verschlussbauwerke bei einhergehender und positiv beschiedener Qualitätsprüfung bzw. Kontrolle signifikant von der Auslegung abweichen.

Es ist anzumerken, dass fehlerhaft erstellte Funktionselemente Einfluss auf die Funktionsdauer bzw. eine verspätete Funktionsaufnahme der Verschlussbauwerke haben können. So könnte mit einer verringerten Dichtwirkung eines Dichtelementes ein höherer Lösungstransport und damit beschleunigte Alteration verbunden sein.

Konkrete Angaben über eine verringerte Funktionsdauer aufgrund einer Errichtung der Schacht- und Streckenverschlüsse, die nicht die spezifizierten Anforderungen erfüllen, gestalten sich äußerst schwierig. Einschätzungen hierzu sind z. Z. nicht hinreichend

genau ableitbar und müssen daher als höchst subjektiv gewertet werden. Gleiches gilt auch für die Einschätzung einer verspäteten Aufnahme des vorgesehenen Wirkungsvermögens.

## **Schritt 2) „Bezug zu den FEP des FEP-Kataloges“**

Die hier betrachtete alternative Betrachtung der Annahme hat einen direkten Bezug zu einer Reihe von FEP des FEP-Kataloges, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (Initial-FEP)
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses (Initial-FEP)
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Quellen des Bentonits (Initial-FEP)
- Auflockerungszone (Initial-FEP)

Insbesondere sind die beiden o. g. FEP zum vorzeitigen Versagen von Strecken- und Schachtverschlüssen hervorzuheben, da diese FEP aufgrund ihrer als weniger wahrscheinlich eingestuften bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit und der Methodik zur Entwicklung von Szenarien ebenfalls im Rahmen von Alternativszenarien behandelt werden (vgl. Kapitel 6.1.4).

Darüber hinaus bestehen in den Abhängigkeiten zu den jeweiligen o. g. FEP weitere Verbindungen zu FEP, die an dieser Stelle jedoch nicht benannt werden. Es wird vielmehr auf den FEP-Katalog verwiesen, der diese Abhängigkeiten im Detail beschreibt und die entsprechenden FEP ausweist.

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass sich die FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* und *Quellen des Bentonits* nur auf den Schachtverschluss beziehen. Darüber hinaus können die in diesen FEP beschriebenen Prozesse zu einer direkten Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barriere „Schachtverschluss“ führen.

### **Schritt 3) „Potenzieller Unterschied zum Referenzszenarium“**

Bei den Entwicklungsmöglichkeiten ist zu beachten, dass sich die Abweichung von der spezifischen Annahme jeweils nur auf ein Verschlussbauwerk bezieht und dass die hydraulische Leitfähigkeit gegenüber der Auslegung erhöht ist. Das heißt, von einer gleichzeitigen Abweichung von der Annahme für mehr als ein Verschlussbauwerk sowie dem Verlust des gesamten Wirkungsvermögens eines Verschlusses ist nicht auszugehen.

#### **Alternativszenarien**

Das Alternativszenarium wird an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt, da die damit verbundene Entwicklungsmöglichkeit repräsentativ in den Alternativszenarien A1w1 und A1w2 mit Bezug zu den weniger wahrscheinlichen FEP

- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses und
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

behandelt wird (Kapitel 6.1.4.2 und 6.1.4.3).

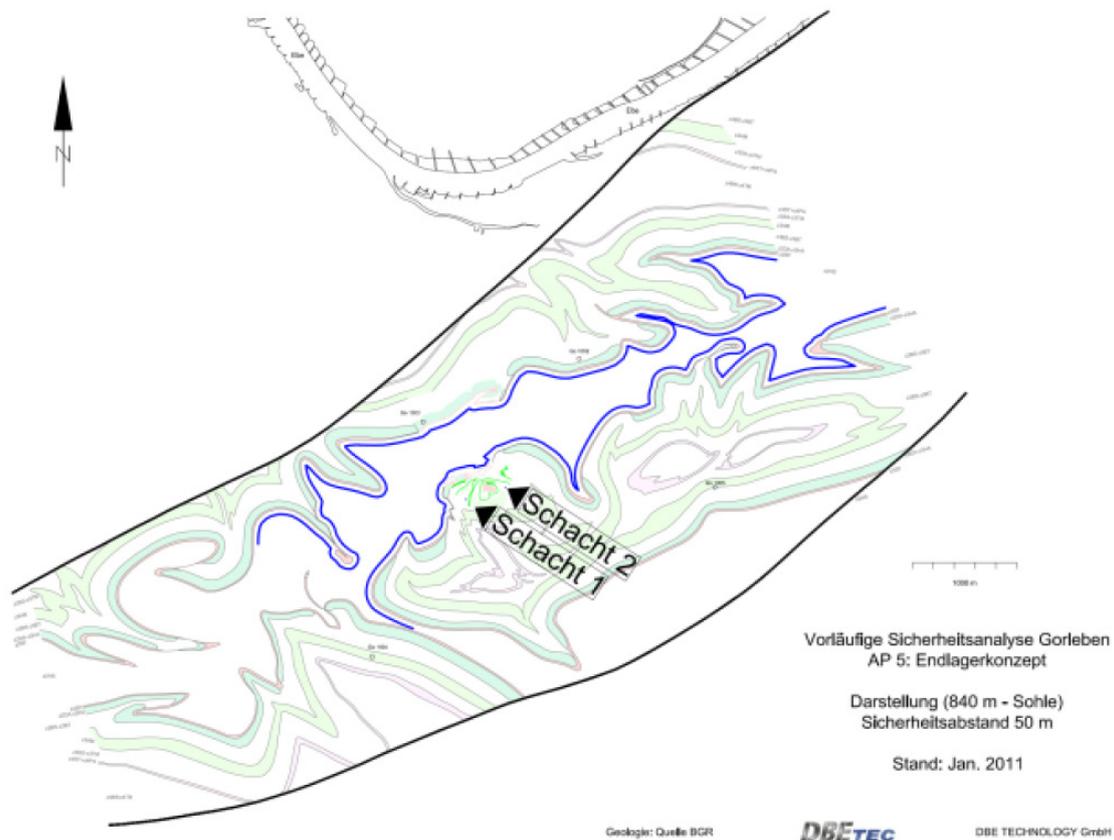
#### **6.1.1.3 Spezifische Annahme zum Sicherheitsabstand**

##### **Spezifische Annahme**

„Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) von den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.“

Die Abb. 6.1 zeigt die auf der Grundlage von Erkundungsergebnissen hergeleitete geologische Karte (horizontaler Profilschnitt) für die Erkundungssohle (840 m Teufe) mit skizzierten Sicherheitsabstand. In den Endlagerkonzeptionen wird dieses angenommene geologische Profil auch für den Einlagerungshorizont (870 m Teufe) zugrunde gelegt /BOL 11/.

Die Darstellung gibt einen orientierenden Eindruck über den gekrümmten Verlauf des einzuhaltenden Sicherheitsabstandes zu den begrenzenden Gesteinsschichten des Hauptsalzes.



**Abb. 6.1** Angenommene geologische Struktur des Erkundungshorizontes (840 m Teufe) am Standort Gorleben mit eingezeichnetem Sicherheitsabstand (blaue Linie) (aus /BOL 11/ entnommen)

### Schritt 1) „Bestimmung möglicher Alternativen“

Das aus der o. g. Annahme abzuleitende Alternativszenarium wird darauf ausgerichtet, dass der Planungswert des Sicherheitsabstandes unterschritten wird. Es ist daher ein verringerter Abstand ( $d < 50 \text{ m}$ ) für die zu betrachtende Abweichung zugrunde zu legen.

Ein verringerter Abstand kann theoretisch den Wertebereich ( $0 \text{ m} \leq d \leq 50 \text{ m}$ ) einnehmen. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass bei einer Auffahrung die potenziell lösungsführenden Schichten direkt angetroffen werden (das heißt, der Abstand auf 0 m schrumpft), da der Streckenauffahrung umfangreiche geologische und geophysikalische

sche Erkundungsarbeiten vorgeschaltet sind. Auf die Nähe von möglicherweise vorliegenden Wegsamkeiten wie Klüften, Störungen und Rissen kann ausgehend vom struktureologischen Lagerstättenmodell rückgeschlossen werden, da derartige Bildungen nur bei bestimmten salztektonischen Rahmenbedingungen beobachtet werden.

Hinsichtlich der alternativen Betrachtung ist davon auszugehen, dass durch fehlinterpretierte Erkundungsergebnisse oder unerkannte geologische Merkmale trotz umfangreicher Qualitätssicherungsmaßnahmen ein verringerter Sicherheitsabstand vorliegt. Mögliche Abweichungen und Faktoren für eine Verringerung werden im Folgenden getrennt für potenziell lösungsführende Gesteine und Wegsamkeiten diskutiert.

### **Potenziell lösungsführende Gesteine**

Um die Lage der potenziell lösungsführenden Gesteine zu charakterisieren, muss die Basis des Kaliflözes Staßfurt (z2SF) bzw. des Hauptanhydrits (z3HA) sicher nachgewiesen werden, da diese den Bezugshorizont für die Bemessung des Sicherheitsabstandes darstellen.

Die Erkundung wird den lokalen Gegebenheiten im laufenden Erkundungsbetrieb angepasst. Sie umfasst neben den konventionellen geologischen Erkundungsmethoden wie Kartierung, Erkundungsbohrungen und tektonische Auswertungen auch geophysikalische Methoden wie EMR-Messungen und geochemische Analysen. All diese Erkundungsergebnisse werden zu einem integralen konsistenten Lagerstättenmodell zusammengefügt. Aus dieser Art der bedarfsabhängigen Erkundung und nachfolgender integralen Auswertung resultiert eine genaue Abbildung der Schichtlagen.

Die Auflösungstoleranz der EMR-Messung liegt im Zentimeter bis Meterbereich. In der Praxis hat sich gezeigt, dass bei Anwendung einer den geologischen Gegebenheiten angepassten Erkundung und Auswertung für die Lage der Schichtgrenzen in einer Entfernung im Bereich des Sicherheitsabstandes eine Toleranz, die alle Ungewissheiten inklusive Fehlinterpretationen einschließt, von +/-5 m anzusetzen ist. Als Sicherheitsaufschlag wird eine Verdopplung der Toleranz zugrunde gelegt. Damit ergibt sich im ungünstigen Fall eine Verringerung des Sicherheitsabstandes um 10 m.

Dieser Wert ist jedoch nur vereinzelt und lokal begrenzt anzusetzen, da die hierin enthaltene Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen eher den Ausnahmefall darstellen dürfte. Ausgehend von den Toleranzen für die Erkundung und den vorauszuset-

zenden umfangreichen Qualitätssicherungsmaßnahmen wird die genannte Verringerung des Sicherheitsabstandes als weniger wahrscheinlich eingeschätzt.

### **Unentdeckte Wegsamkeiten innerhalb des Sicherheitsabstandes**

Unter Wegsamkeiten werden potenzielle Fließwege für Lösungen, wie Klüfte, Störungen und Risse, verstanden. Die beiden letztgenannten Merkmale werden im Weiteren unter dem Merkmal Klüfte subsumiert.

Während des Salzaufstiegs kommt es zu einer stetigen Wechselwirkung zwischen lokalen Schädigungsprozessen und Verheilen der Steinsalzschieben. Dadurch können sich in diesen Gesteinen Kluftsysteme oder weitreichende Klüfte in der Regel nicht erhalten.

Im Kernbereich des Hauptsalzes (z2HS) und damit im geplanten Einlagerungsbereich, wurden keine Klüfte nachgewiesen /BOR 08/.

In salztektonischen Ausnahmesituationen wie doppelt gelagertem Kaliflöz Staßfurt (z2SF) können im Kristallbrockensalz (z2HS3) und Hangendsalz (z2HG) offene Klüfte mit wenigen Metern Länge vorkommen /BOR 08/. Die spitzwinklig zur Schichtung angelegten Klüfte reichen bis in einen Abstand von max. 5 m zur Basis des Kaliflözes /BOR 93/.

Alle weiteren Kluftvorkommen sind im Salzstock Gorleben auf die jüngeren Formationen Leine- und Aller-Folge beschränkt. Sie kommen dort im Hauptanhydrit (z3HA) und teilweise im Basissalz/Unteren Liniensalz (z3BS/z3LSU), Orangesalz (z3OS), Anhydritmittelsalz (z3AM), Tonmittelsalz (z3TM) und Tonbrockensalz (z4TS) vor. Für die Betrachtung in diesem Kontext sind diese Klüfte ohne Belang.

Trotz detaillierter geologischer Erkundung kann eine unentdeckte Kluft in der Nähe des Kaliflözes Staßfurt nicht vollkommen ausgeschlossen werden, aber aus geotechnischer Sicht ist die Wahrscheinlichkeit dafür sehr gering (nur auf den unmittelbaren Kontakt zwischen Gesteinen mit Materialkontrasten beschränkt, s. o.), wobei die Reichweite gering ist.

Der Abstand von Grubenbauen zu potenziell lösungsführenden Bereichen kann durch unentdeckte Klüfte um max. 5 m verringert sein. Eine solche Verringerung ist nur in

geologischen Ausnahmesituationen möglich und daher als weniger wahrscheinlich einzustufen.

## **Schritt 2) „Bezug zu den FEP des FEP-Kataloges“**

Die Verbindung zwischen der in Schritt 1 durchgeführten alternativen Betrachtung und den FEP des FEP-Kataloges ergibt sich durch die Diskussion der Gründe für eine Abweichung des Sicherheitsabstandes.

In /MIN 10/ wird ausgesagt, dass ein Verlust der Dichtheit der Salzgesteine nur durch Entstehung von mit einander verbundenen Rissöffnungen in den interkristallinen Strukturen bewirkt werden kann. Hierzu werden die Mechanismen

- deviatorische Beanspruchung mit induziertem Risswachstum
- Vernetzung interkristalliner Risse
- Fluiddruck-induzierte Öffnung von Korngrenzen, und
- Vernetzung interkristalliner Fließwege

als maßgeblich für einen Integritätsverlust benannt.

Demnach gibt es eine direkte Verbindung des Sicherheitsabstandes bzw. seiner zu diskutierenden Verringerung zu den FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* und *Fluiddruck*. Die genannten FEP sind sog. Initial-FEP und liegen damit dem Referenzszenarium zugrunde. Beide FEP sind in den Teilsystemen „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“ und „Wirtsgestein“ zu betrachten. Darüber hinaus besteht zwischen den FEP eine Wechselbeziehung, das heißt, sie beeinflussen sich gegenseitig hinsichtlich ihrer Ausprägung. Die auslösenden und beeinflussenden FEP sind im Anhang A ausführlich dargelegt.

Weitere FEP, die möglicherweise einen Bezug zu der spezifischen Annahme haben, sind nachfolgend aufgeführt:

- *Lösungen im Grubenbau*
- *Wirtsgestein*
- *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein (Initial-FEP)*
- *Fluidvorkommen im Wirtsgestein (Initial-FEP)*
- *Thermische Carnallitzersetzung*

Das FEP *Wirtsgestein* in der o. g. Liste wird durch den örtlichen Bezug der Annahme zu den umliegenden Schichten allgemein angesprochen.

Ein Bezug zu den lösungsführenden Gesteinen ist durch das FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* gegeben.

Das FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* bezieht sich auf den Teil der spezifischen Annahme, der auf die Wegsamkeiten ausgerichtet ist.

Das FEP *Thermische Carnallitzersetzung* ist auch bei einer Verringerung des Sicherheitsabstandes zwischen den Einlagerungsbereichen und den carnallithaltigen Schichten nicht zu berücksichtigen. Mit einer Verringerung des Sicherheitsabstandes erhöht sich zwar die Temperatureinwirkung in den umgebenden Schichten, diese reicht bei einer Verringerung des Sicherheitsabstandes um maximal 10 m aber nicht aus, um im unverritzten Gebirge relevante Mengen an gebundenem Hydratwasser aus dem Carnallit freizusetzen.

### **Schritt 3) „Potenzieller Unterschied zum Referenzszenarium“**

Ein potenzieller Unterschied zum Referenzszenarium ergibt sich dann, wenn aufgrund der Verringerung des Sicherheitsabstandes infolge von Fehlinterpretationen oder unerkannten geologischen Merkmalen ein Integritätsverlust der Salzbarriere nicht ausgeschlossen werden kann.

Die unentdeckten Wegsamkeiten können durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen beeinflusst werden. So ergeben sich durch die eingelagerten wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle thermisch bedingte Spannungsänderungen,

die möglicherweise zu einer Veränderung (z. B. Aufweitung) von unentdeckten Wegsamkeiten führen können. Weiterhin ist mit der Erkundung des Standortes, der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers eine Vielzahl von Eingriffen in die umgebende geologische Struktur verbunden. So werden z. B. Tiefbohrungen zur Erkundung erstellt, Messtechnik eingebracht, Schächte, Strecken, Kammern und betriebsbedingte Hohlräume aufgefahren, Massen bewegt und gelagert, Verankerungen gesetzt und Ausbau betrieben. Diese Eingriffe haben ebenfalls Auswirkung auf das Spannungsfeld am Endlagerstandort, das heißt, der Ausgangsspannungszustand im Wirtsgestein wird im unmittelbaren Umfeld dieser Aktivitäten durch die Handlungen gestört. Das System wird auf das so entstandene Ungleichgewicht mit Spannungsumlagerungen reagieren, um somit einen Gleichgewichtszustand anzustreben.

Es ist daher im Rahmen der Integritätsanalyse fallbezogen zu untersuchen, ob trotz Verringerung des Sicherheitsabstandes die Integrität des Salzgesteins weiterhin gewährleistet ist. Bei positivem Befund, das heißt, die Integrität ist trotz Abweichung gegeben, erübrigt sich eine Berücksichtigung des entsprechenden Alternativszenariums in der radiologischen Konsequenzenanalyse.

### **Alternativszenarien**

Der o. g. Darstellung folgend, lassen sich nachstehende Alternativszenarien formulieren:

#### **Alternativszenarium A1a3**

„Der Sicherheitsabstand zu den potenziell lösungsführenden Gesteinen (Planung 50 m) wird aufgrund von fehlinterpretierten Erkundungsergebnissen bei der Auffahrung des Endlagers unterschritten. Für die Abweichung vom Planungswert sind 10 m anzusetzen.“

#### **Alternativszenarium A1a4**

„Im Übergangsbereich z2/z3 kommen vereinzelte unentdeckte offene Klüfte vor, die bis in einem Abstand von 5 m um die lösungsführenden Gesteine auftreten.“

Zu den beiden Alternativszenarien ist anzumerken, dass eine Verringerung des Sicherheitsabstandes gegenüber dem geplanten Sicherheitsabstand wegen fehlinterpretierter Erkundungsergebnisse und unentdeckter geologischer Merkmale, aufgrund der

umfassenden Standorterkundung sowie umfangreicher Qualitätssicherungsmaßnahmen, um 10 m (A1a3) oder 5 m (A1a4) als weniger wahrscheinlich einzustufen ist. Eine noch größere Verringerung des Sicherheitsabstandes ist unwahrscheinlich. Die Summation der genannten Abweichungen auf 15 m ist aufgrund der getrennt voneinander zu betrachtenden Alternativszenarien ausgeschlossen.

Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass mit den aufgestellten Alternativszenarien zunächst nur die Unterschreitung des geplanten Sicherheitsabstandes verbunden ist. Ob daraus mögliche Konsequenzen resultieren, ist in der Integritätsanalyse zu untersuchen. Die Prüfungen sind dabei primär auf mögliche Einflüsse durch Spannungsänderungen auszurichten. Das heißt, solange die in den Alternativszenarien ausgewiesene Abweichung vom Sicherheitsabstand keinen Einfluss auf die Integrität der verbleibenden Salzbarriere hat, erübrigt sich eine radiologische Konsequenzenanalyse.

#### **6.1.1.4 Spezifische Annahme zur Erkundungssohle**

##### **Spezifische Annahme**

„Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.“

Die von der Erkundungssohle niedergebrachten Erkundungsbohrungen werden in Kapitel 6.1.4.1 abgehandelt, in dem die Betrachtung von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen erfolgt. Hierzu werden mögliche Verbindungen zwischen Grubenbauen der Erkundungs- und der Einlagerungssohle sowie Wegsamkeiten bis in Bereiche des Salzgesteins innerhalb des Sicherheitsabstands zu potenziell wasserführenden Schichten diskutiert.

##### **Schritt 1) „Bestimmung möglicher Alternativen“**

Aus der spezifischen Annahme sind zwei wesentliche unterschiedliche Aspekte auszumachen, die als Grundlage für eine alternative Betrachtung zu untersuchen sind. Hierzu gehört zum einen, dass zwischen Erkundungssohle und Einlagerungssohle aufgrund von Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen Wechselwirkungen bestehen können. Zum anderen können sich durch die Erkundungssohle Einflüsse auf verschiedene ablaufende Prozesse im Einlagerungshorizont ergeben, die möglicher-

weise eine Beeinträchtigung der Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems haben. Im Folgenden wird auf die beiden Aspekte eingegangen:

Die auf der Erkundungs- und Einlagerungssohle aufgefahrenen und später mit Salzgrusversatz verfüllten Hohlräume im Salz werden sich aufgrund von Konvergenzvorgängen sukzessive verringern. Neben den durch die stattfindenden Ausgleichsprozesse resultierenden Spannungsänderungen könnten noch überprägende Spannungen, verursacht z. B. durch den wärmeentwickelnden Abfall und/oder seismischer Aktivitäten, hinzukommen.

Mit der Erstellung von Hohlräumen ist eine Störung des Spannungszustandes und damit des geologischen Umfeldes verbunden. Die Störungen werden mit der Zeit durch Ausgleichsprozesse abgebaut. Die Hohlräume in Salz werden wie bereits oben ausgeführt durch Konvergenzvorgänge reduziert. Der eingebrachte Salzgrusversatz in den Hohlräumen wird dabei kompaktiert. Der Prozess kommt bei Vorliegen eines Spannungsgleichgewichtes zum Erliegen.

Der genannte Prozess findet sowohl auf der Erkundungs- als auch Einlagerungssohle statt. Die Konvergenz ist dabei von vielen Faktoren z. B. örtlichen Spannungen, Temperaturen und Eigenschaften von Salz abhängig. Ein weiterer Faktor könnte sein, dass sich durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen der Ablauf der Konvergenz auf den beiden Sohlen gegenseitig beeinflusst.

Ein weiterer Aspekt bezieht sich auf die Entwicklung des Temperaturfeldes. Der Salzgrusversatz in den Strecken der Erkundungssohle hat gegenüber dem homogenen Salzgestein eine geringere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität. Damit könnte eine Einflussnahme auf die Ausbildung des Temperaturfeldes gegeben sein. Dieser Effekt wird jedoch aufgrund der geringen Hohlraumvolumina als gering eingeschätzt.

## **Schritt 2) „Bezug zu den FEP des FEP-Kataloges“**

Im Prinzip laufen auf der Erkundungssohle die gleichen Prozesse in den aufgefahrenen Richtstrecken und dem Infrastrukturbereich ab, wie auf der Einlagerungssohle. Die Abweichung besteht darin, dass sich auf der Einlagerungssohle die eingebrachten radioaktiven Abfälle in entsprechenden Behältern bzw. Gebinden in Einlagerungsstrecken und bei der Variante A in Kammern befinden. Das heißt, auf der Einlagerungssohle laufen zusätzlich die abfallinduzierten Prozesse ab. Aus dieser

Betrachtungsweise heraus ergibt sich ein direkter Bezug zu einer Reihe von FEP des FEP-Kataloges, die im Zusammenhang mit der Erkundungssohle stehen und im Folgenden aufgelistet sind:

- *Versatz*
- *Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften*
- *Konvergenz (Initial-FEP)*
- *Fluiddruck (Initial-FEP)*
- *Salzgruskompaktion*
- *Kanalisation im Salzgrus*
- *Zersetzung von Organika*
- *Wärmeproduktion*
- *Thermische Expansion oder Kontraktion*
- *Gasbildung*
- *Gasmenge im Grubenbau*
- *Auflockerungszone (Initial-FEP)*
- *Wirtsgestein*
- *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (Initial-FEP)*

Die meisten der o. g. FEP stehen in direktem Zusammenhang mit der Hohlraumreduzierung. Hierzu zählen die FEP *Versatz*, *Konvergenz*, *Fluiddruck*, *Salzgruskompaktion*, *Auflockerungszone*, *Wirtsgestein* und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*.

Eine Reihe weiterer FEP ist auf die Gasentstehung ausgerichtet, die sich im Falle der Erkundungssohle insbesondere auf korrosive Prozesse (verbliebene Verankerungen und ggf. Instrumentierungen) und im geringeren Maße auf mikrobielle Prozesse im Zusammenhang mit nicht rückgebauten organischen Materialien beziehen. Zu nennen sind hier die FEP *Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften*, *Zersetzung von Organika*, *Gasbildung* und *Gasmenge im Grubenbau*. Natürlich besteht mit der Gas-

entwicklung wiederum eine Abhängigkeit bzw. Bezug zu anderen FEP z. B. *Fluiddruck* und *Konvergenz*.

Die beiden übrigen FEP *Wärmeproduktion* und *Thermische Expansion oder Kontraktion* sind auf die thermischen Einflüsse ausgerichtet. Auch diese FEP haben wiederum einen Bezug zu anderen FEP. Die Abhängigkeiten werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Es wird vielmehr auf den FEP-Katalog verwiesen, der diese Abhängigkeiten im Detail beschreibt und die entsprechenden FEP ausweist.

### **Schritt 3) „Potenzieller Unterschied zum Referenzszenarium“**

Es wurden im Schritt 1 alternative Betrachtungen im Hinblick auf eine Wechselwirkung zwischen der Erkundungssohle und der Einlagerungssohle aufgrund von Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen diskutiert.

Auf beiden Sohlen sind Resthohlräume durch die Versatzporosität gegeben. Prinzipiell ist eine gegenseitige Beeinflussung der Konvergenz nicht auszuschließen. Das heißt, aufgrund der übereinanderliegenden Sohlen könnte die Konvergenz verlangsamt ablaufen. Damit würde z. B. die Einlagerungssohle für ein Eindringen von Lösungen länger zugänglich sein.

Analog zur Konvergenz ist auch eine Einflussnahme der Erkundungssohle auf die Temperaturverteilung aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit in den aufgefahre- nen Strecken im Vergleich zum festen Steinsalz möglich. Dieser Effekt wird jedoch als sehr gering erachtet, da die entsprechenden Bereiche mit unterschiedlichen Wärme- eigenschaften vom Ausmaß her als marginal zu betrachten sind.

### **Alternativszenarien**

Nach der o. g. Darstellung lässt sich folgendes Alternativszenarium formulieren:

#### **Alternativszenarium A1a5**

„Zwischen der Erkundungssohle und der Einlagerungssohle bestehen aufgrund von Spannungsänderungen Wechselwirkungen, die die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen.“

#### **6.1.1.5 Radionuklidmobilisierung und -transport**

Im Folgenden wird dargestellt, welche Auswirkungen die alternativen Betrachtungen der spezifischen Annahmen auf die FEP *Radionuklidmobilisierung* und *Radionuklidtransport* haben und ob sich daraus alternative Entwicklungsmöglichkeiten ableiten lassen. Der Transport von Radionukliden ist sowohl auf dem Gaspfad als auch auf dem Lösungspfad zu betrachten.

#### **Klimaentwicklung**

Die in Bezug auf die Klimaentwicklung resultierenden alternativen Betrachtungsfälle (Tab. 6.1) haben keinen vom Referenzszenarium abweichenden Einfluss auf die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport. In beiden Fällen ist aufgrund des ausreichenden Abstandes der Einlagerungsbereiche zu den glazialen Rinnen eine Auswirkung auf die Mobilisierung von Radionukliden und deren Transport auszuschließen. Daher ergeben sich unter Berücksichtigung der Betrachtungsfälle zur Klimaentwicklung keine vom Referenzszenarium abweichenden Entwicklungsmöglichkeiten hinsichtlich der Mobilisierung und des Transportes von Radionukliden.

#### **Anforderungsgerechte Errichtung der Schacht- und Streckenverschlüsse**

Die alternative Betrachtung zur spezifischen Annahme der anforderungsgerechten Errichtung der Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse wird in repräsentativer Weise durch die Berücksichtigung der FEP eines vorzeitigen Versagens von Schacht- und Streckenverschlüssen (Kapitel 6.1.4.2 und Kapitel 6.1.4.3) behandelt. Daher wird an dieser Stelle auf eine weitere Darstellung von möglichen Auswirkungen auf die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport verzichtet und vielmehr auf das Kapitel 6.1.4.5 verwiesen.

#### **Sicherheitsabstand**

Aus den alternativen Betrachtungen zum Sicherheitsabstand von den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen ergeben sich keine Auswirkungen auf die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport. Allein aus einer Verringerung des Sicherheitsabstandes oder auch dem Vorliegen von unerkannten Merkmalen (Klüfte, Störungen) lassen sich keine Mechanismen ableiten, die eine direkte Mobilisierung oder einen Transport von Radionukliden bewirken. Hierzu müssen

eine Reihe weiterer Bedingungen vorliegen, wie eine durchgängige Verbindung und der Lösungszutritt zu den Grubenbauen. Über den Lösungszutritt in die Einlagerungsfelder werden dann indirekt die Radionuklidmobilisierung, die Radionuklidrückhaltung, die Korrosionsprozesse und der Transport der gelösten Radionuklide beeinflusst. Demnach ergeben sich keine Alternativszenarien, die mit der Abweichung von der spezifischen Annahme, der Radionuklidmobilisierung und dem Radionuklidtransport zusammenhängen.

### **Erkundungssohle**

Die alternativen Betrachtungen, die sich aus der Einbeziehung der Erkundungssohle ergeben, haben keine direkte Auswirkung auf die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport. Selbst wenn die zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch auszuwertende Integritätsanalyse eine Integritätsverletzung zwischen Erkundungs- und Einlagerungssohle aufgrund von Spannungsumlagerungen und Spannungsänderungen nicht ausschließen kann, müssen weitere Bedingungen erfüllt sein, die eine Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport ermöglichen. Zu diesen Bedingungen gehört vor allem das Vorhandensein eines Transportpfades und von Lösungen, die in die Erkundungssohle eindringen und von dort über den Transportpfad in die Einlagerungssohle gelangen.

#### **6.1.1.6 Zusammenfassende Darstellung**

Aus den alternativen Betrachtungen zu den spezifischen Annahmen ergeben sich insgesamt fünf Alternativszenarien, die alle als weniger wahrscheinlich eingestuft wurden. Die Tab. 6.2 beinhaltet eine Zusammenstellung der entwickelten Alternativszenarien mit dem Bezug zur spezifischen Annahme.

Die Diskussion zur spezifischen Annahme der auslegungsgerechten Errichtung der Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse hat ergeben, dass die daraus ableitbaren Alternativszenarien in repräsentativer Weise durch die resultierenden Alternativszenarien aus den weniger wahrscheinlichen FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* behandelt werden. Daher sind für diese spezifische Annahme, im Rahmen der alternativen Betrachtungen, keine Alternativszenarien entwickelt worden.

**Tab. 6.2** Zusammenstellung abgeleiteter Alternativszenarien aus alternativen Betrachtungen zu spezifischen Annahmen; Einlagerungsvariante AB1

<b>Bezug (Kurzform* für spezifische Annahme)</b>	<b>Alternativszenarium (Kurzform*) aus alternativer Betrachtung zur spezifischen Annahme</b>
Klimaentwicklung	A1a1: Veränderte Rinnenbildung: erste Rinne: gemäß Gorlebener Rinne zweite Rinne: außerhalb der Gorlebener Rinne bzw. schneidend oder kreuzend
	A1a2: Veränderte Rinnenbildung und Ausprägung: außerhalb der Gorlebener Rinne bzw. schneidend oder kreuzend
Sicherheitsabstand	A1a3: Sicherheitsabstand wird um 10 m unterschritten.
	A1a4: Es liegen vereinzelt unentdeckte offene Klüfte vor, die bis in einem Abstand von 5 m um die lösungsführenden Gesteine auftreten.
Erkundungssohle	A1a5: Zwischen der Erkundungssohle und der Einlagerungssohle bestehen aufgrund von Spannungsänderungen Wechselwirkungen.

\* Die genaue Beschreibung der spezifischen Annahmen und der entwickelten Alternativszenarien sind den Ausführungen unter Kapitel 6.1.1 zu entnehmen.

### 6.1.2 Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP

In diesem Kapitel wird die Entwicklung von Alternativszenarien für die Einlagerungsvariante AB1 unter Berücksichtigung von weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der im Referenzszenarium R1 betrachteten Initial-FEP (Tab. 3.1) dargestellt. Unter „Referenzszenarium“ ist im Folgenden stets R1 zu verstehen.

Zu jedem Initial-FEP wurden die Angaben zu den beeinträchtigten Initial-Barrieren und weitere allgemeine Informationen dem FEP-Katalog entnommen; sie werden im Folgenden jeweils unter Sachlage angegeben. Quellenangaben und Verweise sind dem FEP-Katalog zu entnehmen. Für jedes FEP werden jeweils die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen festgelegt und davon abhängig wird beschrieben, welche Abweichungen vom Referenzszenarium sich durch diese Ausprägungen ergeben. Sollten sich keine Abweichungen ergeben, so ist für dieses FEP kein Alternativszenarium zu betrachten. Für den Fall, dass sich Abweichungen vom Referenzszenarium ergeben, werden die resultierenden und direkt beeinflussten FEP genannt und die wichtigsten Auswirkungen auf diese kurz zusammengefasst.

Prinzipiell ergibt sich aus jedem Initial-FEP, für das eine weniger wahrscheinliche Ausprägung angegeben werden kann, ein zusätzliches Alternativszenarium. In folgenden Fällen wird jedoch kein Alternativszenarium angegeben:

- Für das Initial-FEP kann keine Einordnung der Ausprägung nach der Wahrscheinlichkeit angegeben werden, und es wird für die Zwecke der Szenarienentwicklung eine repräsentative Ausprägung im Referenzszenarium angegeben. In diesen Fällen ist kein Alternativszenarium zu betrachten. Ein Beispiel für diesen Fall ist das FEP *Diapirismus*.
- Mehrere Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen haben Auswirkungen vergleichbarer Art auf die beeinflussten FEP. In diesem Fall werden die entsprechenden Alternativszenarien zu einer Gruppe zusammengefasst und bei dem jeweiligen FEP wird auf das entsprechende repräsentative Alternativszenarium verwiesen. Ein Beispiel für diesen Fall sind die beiden FEP *Metallkorrosion* und *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*, die beide auf die Brennelement-Behälter einwirken. Das Alternativszenarium wird für beide FEP zusammengefasst und beim FEP *Metallkorrosion* beschrieben. Für das FEP *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* wird kein eigenes Alternativszenarium angegeben, sondern auf das FEP *Metallkorrosion* verwiesen.
- Die Auswirkungen eines Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen entsprechen denjenigen eines weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Auswirkung auf eine Initial-Barriere. In diesem Fall werden die entsprechenden Alternativszenarien zu einer Gruppe zusammengefasst und bei dem jeweiligen FEP wird auf das entsprechende repräsentative Alternativszenarium verwiesen. Ein Beispiel für diesen Fall ist das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*, das in seiner weniger wahrscheinlichen Ausprägung bei dem weniger wahrscheinlichen FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* betrachtet wird.

Jedes auf der genannten Vorgehensweise abgeleitete Alternativszenarium ist aufgrund der weniger wahrscheinlichen Ausprägung als weniger wahrscheinliches Szenarium einzustufen.

Die hier zu betrachtenden FEP entsprechen den Initial-FEP, die im Referenzszenarium R1 berücksichtigt wurden. In den folgenden Unterkapiteln wird jedes Initial-FEP nach der dargestellten Vorgehensweise behandelt.

### **6.1.2.1 Erdbeben**

Das FEP *Erdbeben* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“, „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

#### **Sachlage**

Erdbeben kommen nicht gleichmäßig verteilt vor, sondern konzentrieren sich auf bestimmte, durch Besonderheiten im geologischen Bau oder in ihrer geologischen Entwicklung charakterisierte Gebiete. Für die Bundesrepublik Deutschland wurde eine erdbebengeographische Einteilung vorgenommen. Die einzelnen Gebiete sind dabei aufgrund der im Zeitraum von 800 bis 2008 beobachteten Seismizität, der geologischen Entwicklung und der gegenwärtigen tektonischen Verhältnisse voneinander abgegrenzt worden.

#### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Gemäß KTA 2201 wird für Auslegungen von kerntechnischen Anlagen das „Erdbeben mit der für den Standort größten Intensität“ angenommen. Das Bemessungserdbeben der Stärke 7,3 MSK deckt sowohl alle tektonischen Erdbeben als auch die natürlichen Einsturzbeben im Standortbereich ab und wird für die Vorbemessung und im Referenzszenarium verwendet. Eine Angabe hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit der Ausprägung kann nicht gemacht werden, so dass das Bemessungserdbeben für die Zwecke der Szenarientwicklung die repräsentative Ausprägung darstellt.

#### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Das Bemessungserdbeben wird für die Zwecke der Szenarientwicklung als repräsentative Ausprägung des FEP *Erdbeben* im Referenzszenarium berücksichtigt.

Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.1.2.2 Diapirismus**

Das FEP *Diapirismus* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“, „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

## **Sachlage**

Die mit aufsteigenden Salzbewegungen aus tieferen Bereichen verknüpften Vorgänge werden unter dem Begriff der Halokinese zusammengefasst. Eine der Voraussetzungen für das Ablaufen des Prozesses ist eine instabile Dichteschichtung. Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben lässt sich mit Hilfe der Schichtabfolgen vom Zechstein bis Quartär auf und neben der Salzstruktur rekonstruieren. Beim Salzaufstieg traten im Bereich des Hauptsalzes in Höhe der geplanten Einlagerungssohle in 870 bis 900 m Teufe Salzfließgeschwindigkeiten von max. 0,34 mm/Jahr während der Oberkreide und bis 0,07 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär auf. Die eingewanderten Salzmenen hoben dabei die Salzstockoberfläche etwa 0,08 mm/Jahr zur Oberkreidezeit und etwa 0,02 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär. Die Berechnungen zur Randsenkenanalyse belegen, dass die Salzeinwanderung seit ihrem Maximum in der Oberkreide bis zur jüngsten geologischen Vergangenheit stetig abnahm.

## **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Im Referenzszenarium wird für den Diapirismus für eine Million Jahre eine Rate von 0,02 mm/Jahr unterstellt. Dies entspricht einem Gesamtaufstieg der Salzstruktur in einer Million Jahren von 20 m. Dieser Wert wurde aus der Salzaufstiegsrate in der geologischen Vergangenheit abgeleitet. Aus der gegenwärtigen tektonischen Situation am Standort Gorleben ergibt sich keine potenzielle Ursache für einen beschleunigten Salzaufstieg im Nachweiszeitraum. Daher ist am Standort für die Zukunft weiterhin mit einer eher abnehmenden Salzaufstiegsrate zu rechnen. Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird daher wie im Referenzszenarium der oben genannte Wert verwendet.

## **Abweichung vom Referenzszenarium**

Der im Referenzszenarium angenommene Wert stellt den Maximalwert der Salzaufstiegsrate bei der zu erwartenden zukünftigen Entwicklung dar. Die Auswirkung auf die Initial-Barrieren ist größer, je größer die angenommene Salzaufstiegsrate. Aus diesem Grund sind die Auswirkungen der anzunehmenden weniger wahrscheinlichen Ausprägung des Salzaufstiegs – die die gleiche wie im Referenzszenarium ist – auf die Initial-Barrieren durch die Integritätsanalysen und Konsequenzenanalysen für das Referenzszenarium abgedeckt. Durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Salzaufstiegsrate ergibt sich keine Abweichung von der im Referenzszenarium angenommenen Entwicklungsmöglichkeit.

Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.1.2.3 Subrosion**

Das FEP *Subrosion* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“ und „Schachtverschlüsse“.

#### **Sachlage**

Subrosion ist die unter der Erdoberfläche durch Grundwässer stattfindende Ablaugung an wasserlöslichen Evaporitgesteinen. Das Subrosionsgeschehen am Standort Gorleben ist in der Vergangenheit durch den Salzstockaufstieg und eine zeitweilig oberflächennahe Position des Salzstocks charakterisiert. Bestimmend für die zukünftigen Subrosionsraten und die im Nachweiszeitraum zu erwartende Tiefenwirkung der Subrosion ist insbesondere die heutige Tiefenlage des Salzspiegels. Wenn der Salzspiegel in große Tiefen abgesenkt wird, ist von einer deutlichen Verlangsamung der Subrosion auszugehen. Gleichzeitig kommen infolge der Absenkung des Gebietes Sedimente entsprechender Mächtigkeit zur Ablagerung und die Mächtigkeit des Deckgebirges erhöht sich, wobei damit einhergehend eine Beeinflussung der lokalen oberflächennahen Grundwasserverhältnisse möglich ist. Unter Berücksichtigung dieser Einflüsse ist im Referenzszenarium mit einer gesamten Subrosion von nicht mehr als 50 m bis 100 m rechnen.

#### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird angenommen, dass sich die Subrosion nicht mit der zunehmenden Tiefenlage des Salzspiegels verlangsamt, und es wird eine gesamte Subrosion von 100 m bis 200 m in einer Million Jahren angesetzt.

Eine eventuelle selektive Ablaugung leichtlöslicher Minerale (vorausseilende Subrosion) ist in Zukunft nur zu erwarten, während es zur Bildung tiefer Rinnen kommt, die den Salzspiegel erreichen. Dieser Prozess wird daher bei dem FEP *Glaziale Rinnenbildung* beschrieben.

## Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Subrosion* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP (Tab. 6.3).

**Tab. 6.3** Subrosion: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
Beeinflusste FEP	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge
	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
	Wirtsgestein
	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
	Schachtverschlüsse
	Topografie

Die Abweichungen vom Referenzszenarium führen zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit. Die Auswirkungen führen vor allem zu einer gegenüber dem Referenzszenarium veränderten Wirtsgesteinsmächtigkeit.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i9 zu betrachten.

### 6.1.2.4 Bildung kryogener Klüfte

Das FEP *Bildung kryogener Klüfte* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Wirtsgestein“.

#### Sachlage

Kryogene Klüfte stellen Bildungen innerhalb von Salzgesteinen dar, die auf eine Abkühlung und Kontraktion zurückzuführen sind und genetisch im Zusammenhang mit Kaltzeiten stehen. Bei einigen Salzstöcken des hannoverschen Raumes wird über steilstehende, verheilte Klüfte berichtet, die eine mit zunehmender Teufe abnehmende Häufigkeit besitzen und durch vorwiegend toniges Material sowie durch neugebildete Kluftminerale oder wässrige Lösungen gefüllt sind. Als eine der möglichen Ursachen für ihre Entstehung wird eine Abkühlung der Salzstöcke bzw. des Nebengebirges in

Folge einer Kaltzeit und die Bildung von Kontraktionsrissen im Salzgestein diskutiert. Temperaturbedingte Klüfte wurden während des Schachtabteufens beobachtet, bei dem das Gefrierverfahren zum Einsatz kam. Die Temperaturgradienten sind dabei zeitlich und räumlich viel extremer als bei den klimatisch bedingten Temperatureinwirkungen.

### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die Möglichkeit der Existenz kryogener Klüfte wird im Referenzszenarium berücksichtigt. Aufgrund der unzureichenden Datenlage und der Ungewissheiten zum Bildungsprozess kann eine Angabe hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit der Ausprägung nicht gemacht werden. Die Betrachtung im Referenzszenarium wird daher für die Zwecke der Szenarienentwicklung als repräsentative Ausprägung betrachtet.

### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Für das FEP *Bildung kryogener Klüfte* wird für die Zwecke der Szenarienentwicklung eine repräsentative Ausprägung im Referenzszenarium berücksichtigt.

Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.1.2.5 Glaziale Rinnenbildung**

Das FEP *Glaziale Rinnenbildung* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“ und „Schachtverschlüsse“.

#### **Sachlage**

Wie im Kapitel 5.1.1 und 5.2.3 genauer ausgeführt, können kaltzeitliche Rinnenbildungen tiefe Einschnitte in den Untergrund verursachen. Die tiefsten Rinnen gehören in Norddeutschland der Elster-Kaltzeit an und erreichen in Lockergesteinen meist Tiefen zwischen 200 und 300 m, im Extremfall von über 500 m, bei Breiten von mehreren Kilometern und Längen bis über hundert Kilometer. Im Festgestein ist die Tiefenerosion aufgrund von Rinnenbildungen wesentlich geringer. In dem Nachweiszeitraum von einer Million Jahre müssen auch Kaltzeiten vom Typ Elster unterstellt werden, so dass mindestens eine weitere Rinnenbildung im Bereich des Standortes möglich wäre.

### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die Anzahl der im Betrachtungszeitraum zu erwartenden Kaltzeiten mit der Ausprägung entsprechend einer Elsterkaltzeit ist beschränkt. Weiterhin ist auch die Wahrscheinlichkeit beschränkt, dass eine zukünftige Kaltzeit vom Typ Elster am Standort zu einer weiteren Rinnenbildung führt. Für das Referenzszenarium wird als wahrscheinliche Ausprägung angenommen, dass es im Nachweiszeitraum erneut zu genau einer Kaltzeit vom Ausmaß der Elster-Kaltzeit und den damit verbundenen Rinnenbildungen am Standort kommt. Dabei wird das Lockersediment gemäß der erreichbaren durchschnittlichen Tiefe von etwa 200 bis 300 m abgetragen. Liegen Teile des Salzstocks flacher als 300 m unter der Oberfläche, so können diese um bis zu 50 m abgetragen werden.

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird angenommen, dass es bei einer Kaltzeit vom Typ Elster zu einer Rinnenbildung am Standort kommt, die dem Verlauf der Gorbener Rinne folgt und bei der die Lockersedimente um bis zu 600 m abgetragen werden. Liegen Teile des Salzstocks höher als etwa 600 m unter der Oberfläche, so können diese um bis zu 50 m abgetragen werden. Für die Rinnenbildung im Salzgestein entspricht die weniger wahrscheinliche Ausprägung derer im Referenzszenarium, weil bisher keine tieferen Rinnen in vergleichbaren Gesteinen beobachtet wurden und diese Ausprägung daher für die Zwecke der Szenarientwicklung als repräsentative Ausprägung angenommen wird.

Als unwahrscheinlich werden am Standort Rinnenbildungen eingeschätzt, die in mehreren zukünftigen Kaltzeiten vom Typ Elster jeweils mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung auftreten.

Eine erneute selektive Subrosion leichtlöslicher Minerale ist nur dann möglich, wenn bisher unbeeinflusste Bereiche des überkippten Kaliflöztes durch tiefreichende Erosion zugänglich gemacht würden. Diese Möglichkeit ist am ehesten im Südwestbereich des Salzstocks zu erwarten. In einem solchen Fall entstünde eine Wegsamkeit, die bis etwa 150 m unter den Salzspiegel reichen würde, das heißt, unter Berücksichtigung der Abtragung von 50 m ergibt sich unter diesen Voraussetzungen eine Wegsamkeit bis zu 200 m unter der Lage des Salzspiegels zu Beginn der Rinnenbildung.

## Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP (Tab. 6.4).

Bei der Rinnenbildung wird durch Erosion Material am Salzspiegel abgetragen und dabei die Mächtigkeit des Wirtsgesteins verringert. Durch Sedimentation wird die entstandene Rinnenstruktur wieder aufgefüllt. Diese Vorgänge führen zur Spannungsänderung und Spannungsumlagerung im Wirtsgestein.

**Tab. 6.4** Glaziale Rinnenbildung: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Beeinflusste FEP	Verschlussmaterial
	Schachtverschlüsse
	Wirtsgestein
	Deck- und Nebengebirge
	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
	Sedimentation
	Topografie

Bei einer ausreichenden Tiefenwirkung der Rinnenbildung können die oberen Dichtelemente der Schachtverschlüsse zwar beeinträchtigt werden, da die Rinnenbildung aber erst zu Zeiten erfolgt, die über die Auslegungsdauer der Schachtverschlüsse hinausgehen, ist dadurch keine Abweichung vom Referenzszenarium zu erwarten. Der Einfluss auf die Topografie, die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge und die Grundwasserströmung im Deckgebirge wird als wenig relevant für den Integritätsnachweis angesehen.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i1 zu betrachten. Kann die Integrität des Wirtsgesteins gezeigt werden, sind die Konsequenzen die gleichen wie im Referenzszenarium. Falls die Integrität nicht gezeigt werden kann, müssen die ermittelten Auswirkungen auch in der Konsequenzenanalyse berücksichtigt werden.

### 6.1.2.6 Versagen eines Brennelement-Behälters

Das FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Brennelement-Behälter“.

#### Sachlage

Die Fertigung von Endlagerbehältern unterliegt einer intensiven Qualitätssicherung. Gleichwohl kann trotz der QS-Maßnahmen eine geringe Fehlerquote nicht ausgeschlossen werden. Von besonderer Relevanz für den Einschluss der radioaktiven Abfälle in den Behältern sind beispielsweise die Dichtheit der Behälterdeckel und der Verschluss der Deckelfuge durch eine Schweißnaht. Die Wahrscheinlichkeit überhaupt einen Behälter mit Fertigungsfehler endzulagern, setzt sich aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Produktionsfehler auftritt, und der Wahrscheinlichkeit, den Fehler trotz Anwendung zerstörungsfreier Prüfmethode nicht zu erkennen, zusammen. Ferner ist der Ausfall von Brennelement-Behältern nach der Funktionsdauer von 500 Jahren vor allem vom Verlauf der Metallkorrosion abhängig (siehe auch Kapitel 6.1.2.14 Metallkorrosion).

#### Weniger wahrscheinliche Ausprägung

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP Versagen eines Brennelement-Behälters wird die Anzahl der im Endlager von Beginn an eingelagerten Behälter mit Fertigungsfehler verstanden. Die Anzahl wird mittels der Binomialverteilung berechnet aus der Fehlerrate für Behälter mit Fertigungsfehler im Herstellungsprozess und der Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Anzahl von Behältern mit Fertigungsfehlern im Endlager einzulagern (siehe auch Anhang A). Für die Fehlerrate der behälterspezifischen Fertigungsprozesse liegen keine Daten vor, weshalb im Referenzszenarium R1 in Anlehnung an andere Endlagerprojekte eine Fehlerrate von 0,1 % angesetzt wird. Dieser Wert wird zum Zwecke der Szenarientwicklung als repräsentative Ausprägung angenommen, und eine weniger wahrscheinliche Ausprägung für die Fehlerrate wird nicht angegeben. Für die Wahrscheinlichkeit der Einlagerung von Behältern mit Fertigungsfehlern im Endlager wird als wenig wahrscheinlicher Wert entsprechend der Sicherheitsanforderungen ein Wert von 1 % zugrunde gelegt. Damit errechnet sich die Anzahl der in das Endlager eingelagerten Behälter mit Fertigungsfehlern zu sechs POLLUX-10 und drei CASTOR-Behältern. Die Position der Behälter mit Fertigungsfehlern im Endlager ist unbekannt. Der Behälterausfall aus einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung der FEP Metallkorrosion und Materialversprödung durch Wasser-

stoffaufnahme wird gesondert betrachtet (siehe auch Kapitel 6.1.2.14 und Kapitel 6.1.2.16).

Als unwahrscheinliche und somit nicht zu betrachtende Ausprägung des FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* wird angenommen, dass mehr als die genannte Anzahl der Behälter von Beginn an unerkannte Fertigungsfehler aufweisen.

### Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP (Tab. 6.5).

Durch die höhere Anzahl der Brennelement-Behälter mit unerkannten Fertigungsfehlern ist durch den Ausfall eine entsprechend höhere Radionuklidmobilisierung volatiler Radionuklide zu erwarten. Im Fall des Vorhandenseins von Lösungen sind eine Korrosion der Brennstoffmatrix und eine Radionuklidmobilisierung in Lösung zu erwarten.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i2 zu betrachten.

**Tab. 6.5** Versagen eines Brennelement-Behälters: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	Radionuklidmobilisierung
<b>Beeinflusste FEP</b>	Brennelement-Behälter
	Korrosion der Brennstoffmatrix
	Metallkorrosion
	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

### 6.1.2.7 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

## **Sachlage**

Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen behandelt die Veränderungen der Eigenschaften der Verschlussmaterialien aufgrund geochemischer Milieuveränderungen in den Grubenbauen. Die Eigenschaften der Verschlussmaterialien und konstruktive Eigenschaften der Schacht- und Streckenverschlüsse bestimmen die Beständigkeit der Barrieren bei Lösungszutritt und unterschiedlichen geochemischen Milieus. Die Verschlüsse wurden für ihre vorgesehene Funktionsdauer von 50.000 Jahren entsprechend dem zu erwartenden Lösungsschemismus ausgelegt. Durch die Auswahl und Diversifikation der Verschlussmaterialien und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei ihrer Herstellung und dem Einbau wird eine Alteration der Verschlussmaterialien begrenzt und verzögert.

## **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird betrachtet, dass die Alteration der Verschlussmaterialien der Strecken- und Schachtverschlüsse aufgrund geochemischer Milieuveränderungen nicht dem bei der Auslegung angenommenen Verhalten entspricht. Durch eine verstärkte Alteration der Verschlüsse wird die Permeabilität über den Referenzwert hinaus erhöht. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Alteration und der resultierenden Veränderung der Verschlusseigenschaften, wie der Permeabilität, kann ohne weitere Analysen nicht ermittelt werden.

## **Abweichung vom Referenzszenarium**

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.6).

**Tab. 6.6** Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
Beeinflusste FEP	Kolloide
	Auflockerungszone
	Gaseindringdruck
	Geochemisches Milieu im Grubenbau
	Quellen des Bentonits
	Kanalisation in Dichtelementen
	Permeabilität
	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
	Porosität
	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
	Konvergenz
	Schachtverschlüsse
	Streckenverschlüsse
Verschlussmaterial	

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* führen vor allem zu einer Veränderung der entsprechenden Eigenschaften der Strecken- und Schachtverschlüsse selbst. Dies betrifft auch jene Eigenschaften, die Transportvorgänge durch die Verschlüsse bestimmen, wie die Permeabilität, die Porosität und den Gaseindringdruck. Weiterhin kann es am Rand der Verschlüsse zur Reaktivierung der möglicherweise noch nicht verheilten Auflockerungszone und einer Beeinflussung der Konvergenz kommen.

Die Veränderungen der transportbestimmenden Eigenschaften können zu einem erhöhten Lösungs- und Gasstrom und eventuell Radionuklidtransport über die Verschlüsse führen.

Obwohl die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit führen, werden sie nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und be-

einflusssten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A1w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

#### **6.1.2.8 Konvergenz**

Das FEP *Konvergenz* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

##### **Sachlage**

Mit der Auffahrung von Hohlräumen setzt als Folge der vorliegenden Gebirgsspannungen unmittelbar Konvergenz ein, die zu einer Verringerung des Hohlraumvolumens führt. Messungen am Standort zeigen gesteinspezifische Unterschiede im Verformungsverhalten. Diese Unterschiede werden durch die Ausweisung von Homogenbereichen mit Einteilung des Wirtsgesteins in Kriechklassen mit einer Werteskala von 0 bis 9 berücksichtigt (ausgehend von der geologischen Kartierung und einer statistisch abgesicherten experimentellen gesteinsmechanischen Probenprüfung). Höhere Zahlen stehen dabei für ein besseres Kriechvermögen, während niedrigere Zahlen ein geringeres Kriechvermögen charakterisieren.

##### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird eine Abweichung von den jeweiligen für das Referenzszenarium gültigen Kriechklassen einer stratigraphischen Einheit gewählt. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung besteht dabei über den für eine stratigraphische Einheit gültigen Bereich der Kriechklassen hinaus, welcher sich aus der Ungewissheit bei der experimentellen Bestimmung der Kriechklassen ergibt und soll eine Klasse hin zu größeren und zu kleineren Kriechklassen betragen.

##### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Konvergenz* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflusststen FEP (Tab. 6.7).

**Tab. 6.7** Konvergenz: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
<b>Beeinflusste FEP</b>	Spannungsänderung und Spannungs-umlagerung
	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
	Auflockerungszone
	Wirtsgestein
	Porosität
	Quellen des Bentonits
	Lageverschiebung des Schacht-verschlusses
	Nicht thermisch induzierte Volumen-änderung von Materialien
	Fluiddruck
	Salzgruskompaktion
	Sonstige Verschlussbauwerke
	Streckenverschlüsse
	Schachtverschlüsse
	Verschlussmaterial
	Wegsamkeiten in Erkundungs-bohrungen
	Versatz
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	

Durch eine Einteilung der stratigraphischen Einheiten in eine andere Kriechklasse wird nicht die Nachbildung der grundsätzlichen Prozessabläufe verändert, sondern vor allem der zeitliche Ablauf der Konvergenz und der daraus folgenden Prozesse wird beschleunigt oder verzögert. Dadurch können Wegsamkeiten, wie Auflockerungszonen und Störungen und Klüfte im Wirtsgestein, langsamer, bzw. schneller verheilen, und der Einspannungsdruck für die geotechnischen Barrieren wird früher oder später erreicht. Ebenso verläuft die Salzgruskompaktion langsamer bzw. schneller.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i3 zu betrachten.

### **6.1.2.9 Fluiddruck**

Das FEP *Fluiddruck* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“, „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

#### **Sachlage**

Der Fluiddruck ist der an einem bestimmten Referenzpunkt in einem Grubenbau herrschende Druck im Gas bzw. in der Lösung. Während der Fluiddruck in der gesamten Gasmenge praktisch konstant ist, nimmt der Fluiddruck in der Lösung durch den hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule nach unten hin zu. Die Höhe der Flüssigkeitssäule hängt vom betrachteten Szenarium ab. Treten Lösungen und Gase gleichzeitig in einem Grubenbau auf, so stehen sie an der Phasengrenze unter einem gemeinsamen Druck. Ab dieser Stelle erhöht sich in der Lösung nach unten hin der Druck hydrostatisch entlang der Flüssigkeitssäule.

#### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Fluiddruck* ergibt sich aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen seiner beeinflussenden FEP (Anhang A). Die Ausprägung wird als Ergebnis der Konsequenzenanalysen für alle Bereiche des Endlagers ermittelt und kann in den unterschiedlichen Endlagerflügeln oder Einlagerungsfeldern unterschiedliche Werte haben. Aus diesem Grund wird für dieses FEP weder eine wahrscheinliche, noch eine weniger wahrscheinliche Ausprägung festgelegt. Aufgrund des Prozesses der Gasinfiltration in das Wirtsgestein ist ein Fluiddruck oberhalb des lokalen lithostatischen Drucks als unwahrscheinlich anzusehen.

#### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Ein alternatives Szenarium kann nicht angegeben werden.

### **6.1.2.10 Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien**

Das FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“, „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

## **Sachlage**

Volumenänderungen entstehen bei Behältermaterialien sowie bei eventuell im Endlager verbleibenden technischen Einrichtungen durch Korrosion. Bei Materialien mit Zement oder Sorelphasen, die als Barrierenbaustoffe vorgesehen sind, kann es während des Abbindens zum Schrumpfen kommen bzw. bei der Durchströmung von salinaren Lösungen zur Quellung kommen. Weitere Möglichkeiten der nicht thermisch induzierten Volumenänderung ergeben sich durch die mikrobielle und thermochemische Sulfat-reduktion sowie dem Vergipsen von Anhydrit bei Lösungskontakt. Außerdem kommt es bei Setzungen des Schotterversatzes im Infrastrukturbereich oder der Schotterwiderlager in den Schächten zu Volumenänderungen.

## **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die chemischen Prozesse, die zu nicht thermischen Volumenänderungen führen, können durch Reaktionsgleichungen hinreichend genau beschrieben werden. Der Kenntnisstand der chemischen Prozesse ist damit so hoch, dass keine weniger wahrscheinlichen Ausprägungen unterstellt werden müssen. Zusätzlich existieren Ungewissheiten bezüglich der Ausprägung der Setzung des Schotters im Schachtverschluss. Diese Ausprägungen sind im FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* berücksichtigt.

## **Abweichung vom Referenzszenarium**

Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.1.2.11 Lageverschiebung des Schachtverschlusses**

Das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Schachtverschlüsse“.

## **Sachlage**

Der Schachtverschluss ist ein Bauwerk, welches sich aus Dichtelementen und Widerlagern zusammensetzt. Damit die Dichtelemente als Dichtungen wirksam sein können, dürfen sie bei angreifendem Fluiddruck von oben oder von unten nicht aus ihrer Position verschoben werden, da ansonsten Abrisse von der umliegenden Gebirgskontur und damit Umläufigkeiten entstehen würden. Daher werden die Dichtelemente durch Widerlager in ihrer Position fixiert. Während der vorgesehenen Funktionsdauer der

Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren wird sich durch Diapirismus eine Lageverschiebung der Verschlüsse um ca. 1 m ergeben /WOL 12b/. Diese Verschiebung wird aber durch die Auslegung der Verschlüsse abgedeckt. Mögliche weitere Ursachen für Lageverschiebungen könnten Auslaugungen im Salzgebirge, Kriechen des Salzes, oder die Setzung der Schottersäule sein.

### Weniger wahrscheinliche Ausprägung

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird betrachtet, dass sich die Schachtverschlüsse nicht auslegungsgemäß verhalten. Entgegen der Auslegung findet eine Lageverschiebung in einem Umfang statt, die zu einer signifikanten Erhöhung der Permeabilität über den Referenzwert hinaus führt. Die resultierende Veränderung der Verschlusseigenschaften, wie der Permeabilität, ist daher einzubeziehen.

### Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.8).

**Tab. 6.8** Lageverschiebung des Schachtverschlusses: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
Beeinflusste FEP	Kanalisation in Dichtelementen
	Quellen des Bentonits
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
	Schachtverschlüsse
	Konvergenz
	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* führen vor allem zu einer Veränderung der entsprechenden Eigenschaften der Schachtverschlüsse selbst und im ungünstigsten Fall folgt ein vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses.

Obwohl die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP zu einer alternativen Entwicklung führen, werden sie nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP in dem repräsentativen Alternativszenarium A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ berücksichtigt, das aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet wird.

#### **6.1.2.12 Quellen des Bentonits**

Das FEP *Quellen des Bentonits* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Schachtverschlüsse“.

#### **Sachlage**

Bentonit wird aufgrund seiner günstigen Eigenschaften in den Verfüll- und Verschlusskonzepten für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinen als Baustoff für Dichtelemente eingesetzt. Diese Eigenschaften umfassen die Plastizität, das Quellvermögen bei Wasserzutritt und die geringe Permeabilität. Der Quelldruck des Bentonits bewirkt im eingespannten Zustand einen Druckaufbau in der Kontaktfuge zwischen Dichtelement und Gebirge.

#### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird betrachtet, dass sich der Bentonit nicht auslegungsgemäß verhält. Entgegen der Auslegung quillt er nicht ausreichend, so dass die Permeabilität des entsprechenden Dichtelements nicht dem Auslegungswert entspricht. Die um das Dichtelement befindliche Auflockerungszone verheilt durch den fehlenden Gegendruck nicht wie vorgesehen.

#### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Quellen des Bentonits* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP (Tab. 6.9).

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP *Quellen des Bentonits* führen vor allem zu einer Veränderung der entsprechenden Eigenschaften des Dichtelements selbst. Dabei ist besonders die Änderung der Permeabilität relevant.

Obwohl die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP zu einer alternativen Entwicklung führen, werden sie nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP in dem repräsentativen Alternativszenarium A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ berücksichtigt, das aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet wird.

**Tab. 6.9** Quellen des Bentonits: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
<b>Beeinflusste FEP</b>	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
	Auflockerungszone
	Verschlussmaterial
	Schachtverschlüsse
	Fluiddruck
	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
	Porosität

### 6.1.2.13 Auflösung und Ausfällung

Das FEP *Auflösung und Ausfällung* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“, „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

#### Sachlage

In Anwesenheit von Lösungen laufen permanent Auflösungs- und Ausfällungsprozesse ab; diese können viele der Materialien im Endlagersystem betreffen. Allgemein können Schacht- und Streckenverschlüsse, Dichtpfropfen, Salzgrusversatz und Wirtsgestein durch Auflösungen für Fluide durchlässiger und durch Ausfällung (Krustenbildung) undurchlässiger werden. In Bezug auf Strecken- und Schachtverschlüsse ist dieses FEP mit dem FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* verknüpft.

### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die quantitativen und qualitativen Ausprägungen des FEP *Auflösung und Ausfällung* können mit Hilfe geochemischer Rechenprogramme eingeschätzt werden und sind mit Transportprozessen eng verknüpft. Für dieses FEP kann weder eine wahrscheinliche, noch eine weniger wahrscheinliche oder unwahrscheinliche Ausprägung festgelegt werden. Potenzielle negative Auswirkungen bezüglich des Verhaltens der Barrierenbaustoffe werden durch die Alternativszenarien A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A1w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ abgedeckt.

### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Ein alternatives Szenarium kann nicht angegeben werden.

#### **6.1.2.14 Metallkorrosion**

Das FEP *Metallkorrosion* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Brennelement-Behälter“.

#### **Sachlage**

Korrosion bezeichnet die chemische oder eine elektrochemische Reaktion eines Werkstoffs (hier Metall) mit Stoffen aus seiner Umgebung unter Beeinträchtigung seiner Funktion. Im Falle der Stahlkorrosion wird die Reaktion wesentlich vom pH-Wert und der Verfügbarkeit von Sauerstoff (aerobe Korrosion/Säure oder Wasserstoffkorrosion) kontrolliert. Im verschlossenen Endlager wird der vorhandene Luftsauerstoff schnell durch aerobe Korrosionsreaktionen an Behältermaterialien und sonstigen Bergwerkeinrichtungen verbraucht. Danach finden nur noch anaerobe Korrosionsprozesse unter Bildung von Wasserstoffgas statt. Dabei wird Wasser verbraucht und Salze kristallisieren aus.

### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Für die Metallkorrosion wurden Korrosionsraten an einer Vielzahl von Proben in unterschiedlichen Lösungen und bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt. Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird angenommen, dass die Metallkorrosion schneller voranschreitet als für das Referenzszenarium angenommen. Die Ableitung eines Wer-

tebereichs für eine weniger wahrscheinliche Ausprägung erfolgt auf der gegenwärtigen Datenbasis /MÖH 11/ mit Hilfe von entsprechenden Analysen.

### Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Metallkorrosion* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP (Tab. 6.10).

**Tab. 6.10** Metallkorrosion: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	Gasbildung
Beeinflusste FEP	Radionuklidmobilisierung
	Sorption und Desorption
	Geochemisches Milieu im Grubenbau
	Lösungen im Grubenbau
	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
	Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
	Versagen eines Brennelement-Behälters
	Sonstige Endlagerbehälter
	Abfallmatrix
	Brennelement-Behälter
	Inventar: Metalle
	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
	Kolloide

Durch die stärkere Korrosion der Metalle ergeben sich eine dementsprechend stärkere Gasbildung von Wasserstoff und eine Volumenzunahme der korrodierten Metalle durch Korrosionsprodukte. Bei der Korrosion aktivierter Metallteile kommt es weiterhin zu einer verstärkten Radionuklidmobilisierung. Im Falle der Korrosion von Brennelement-Behältern kann es zu vermehrten Behälterausfällen als im Referenzszenarium kommen. Die Sorption und Desorption sowie das geochemische Milieu im Grubengebäude können beeinflusst werden. Die Auswirkungen auf die weiteren angegebenen Prozesse werden als gering eingeschätzt.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i4 zu betrachten.

#### **6.1.2.15 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen**

Das FEP *Korrosion von Materialien mit Zement oder Sorelphasen* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

##### **Sachlage**

Unter der Korrosion von Materialien mit Zement oder Sorelphasen werden eine Reihe von chemischen Wechselwirkungen mit anstehenden Lösungen und deren Komponenten verstanden, die zur Veränderung der mechanischen, hydraulischen und chemischen Eigenschaften des Materials führen.

##### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die Ausprägung der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen wird hier nur hinsichtlich der Strecken- und Schachtverschlüsse betrachtet. Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird betrachtet, dass aufgrund eines abweichenden geochemischen Milieus die Barrierenbaustoffe stärker korrodiert werden. Dadurch entspricht die Permeabilität des jeweiligen Dichtelementes nicht dem Auslegungswert. Die tatsächliche Ausprägung der Korrosion und die resultierende Veränderung der Verschlusseigenschaften, wie der Anstieg der Permeabilität, sind zu ermitteln. Die Ausprägung kann wegen der unterschiedlichen geochemischen Bedingungen lokal unterschiedlich sein.

##### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.11).

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* führen vor allem zu einer Veränderung des Verschlussmaterials sowie deren Eigenschaften. Die Veränderungen der transportbestimmenden Eigenschaften von Verschlüssen können zu einem erhöhten Lösungs- und Gasstrom und eventuell Radionuklidtransport über die Verschlüsse und Bohrungen führen.

Obwohl die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit führen, werden sie nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP in den repräsentativen Alternativszenarien A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A1w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

**Tab. 6.11** Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
Beeinflusste FEP	Sonstige Endlagerbehälter
	Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
	Verschlussmaterial
	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
	Lösungen im Grubenbau
	Geochemisches Milieu im Grubenbau
	Radionuklidmobilisierung
	Sorption und Desorption
	Abfallmatrix
	Inventar: Sonstige Stoffe
	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
	Sonstige Verschlussbauwerke
	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
	Ausfall eines Dichtpfropfens
	Kolloide

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des beeinflussten FEP *Radionuklidmobilisierung* wird gesondert betrachtet. Die Auswirkungen auf die weiteren angegebenen Prozesse werden als gering eingeschätzt und führen nicht zu weiteren Alternativszenarien.

### **6.1.2.16 Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme**

Das FEP *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Brennelement-Behälter“.

#### **Sachlage**

Das Phänomen spielt vor allem bei der Beurteilung der Festigkeitseigenschaften von Metallen eine Rolle. Stähle sind besonders von Wasserstoffversprödung betroffen. In chemischen Prozessen (z. B. Metallkorrosion) gebildeter atomarer Wasserstoff dringt in das Gefüge von metallischen Werkstoffen ein, wo er sich an Gitterstörstellen wieder zu molekularem Wasserstoff verbindet und dort verbleibt. Durch die Einlagerung des Wasserstoffs in das Metallgitter wird dieses geweitet. Das führt zu inneren Spannungen und zu einer Versprödung des Metalls. Auch wenn der Wasserstoff wieder aus dem Metall austritt, ist durch den Gitterfehler eine dauerhafte Schwächung der Struktur eingetreten.

#### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die Brennelement-Behälter werden so ausgelegt, dass entsprechend den Sicherheitsanforderungen ein Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit bei wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sind. Sollte bei einzelnen Behältern als weniger wahrscheinliche Ausprägung die Materialversprödung zu einem Versagen eines Brennelement-Behälters führen, so wird diese Art des Behälterausfalls unter dem FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* subsumiert, weil die Behälter damit ihre Auslegungsanforderung nicht erfüllen. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* fällt gegenüber den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* und *Metallkorrosion* nicht ins Gewicht.

#### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* wird durch die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* und *Metallkorrosion* abgedeckt und muss daher nicht in einem separaten Alternativszenarium berücksichtigt werden.

### **6.1.2.17 Auflockerungszone**

Das FEP *Auflockerungszone* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Streckenverschlüsse“ und „Schachtverschlüsse“.

#### **Sachlage**

Nach Erfahrungen im Salzbergbau und im Erkundungsbergwerk Gorleben bildet sich nach der Auffahrung von Grubenräumen ab einer bestimmten Teufe eine Auflockerungszone an der Hohlraumkontur. Die Mächtigkeit dieser Auflockerungszone ist für Einzelhohlräume, deren Nahfeldwirkungen sich nicht überlagern, in der Regel kleiner als der Streckendurchmesser. Die Auflockerungszone wird vor der Errichtung von Schacht- und Streckenverschlüssen sowie Dichtpfropfen in den Einbaupositionen so weit wie möglich entfernt. Die möglicherweise verbleibende Restschädigungszone kann bei Bedarf durch Injektionen abgedichtet werden.

#### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Der zeitliche Ablauf der Ausbildung und Verheilung der Auflockerungszone ist nur unzureichend bekannt. Als weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Auflockerungszone* wird daher betrachtet, dass der Erfolg des Beraubens der Auflockerungszone um die Verschlussbauwerke nicht gesichert ist. Als Folge wird die Mächtigkeit der Auflockerungszone im Vergleich zum Referenzszenarium nicht verringert, bzw. deren ursprüngliche Mächtigkeit kann sich wieder bilden. Als weniger wahrscheinliche Ausprägung der Mächtigkeit der Auflockerungszone um die Verschlussbauwerke wird ein Wert angenommen, der jenem vor der Beraubung entspricht. Die Folge der größeren Mächtigkeit sind veränderte hydraulische Eigenschaften der Auflockerungszone.

#### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Auflockerungszone* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.12).

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP *Auflockerungszone* führen vor allem zu einer Veränderung der entsprechenden Eigenschaften der Strecken- und Schachtverschlüsse sowie der Dichtpfropfen. Dies betrifft auch jene Eigenschaften, die Transportvorgänge durch die Verschlüsse bestimmen, wie die integrale Permeabilität. Weiterhin kann es andere – die Verschlussbauwerke beeinflussende – FEP verstärken,

wie *Alteration* und *Kanalisation in Dichtelementen*. Die Veränderungen der transportbestimmenden Eigenschaften können zu einem erhöhten Lösungs- und Gasstrom und eventuell Radionuklidtransport über die Verschlüsse führen.

Obwohl die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit führen, werden sie nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP in den repräsentativen Alternativszenarien A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A1w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

**Tab. 6.12** Auflockerungszone: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
<b>Beeinflusste FEP</b>	Matrixdiffusion
	Thermomigration
	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
	Wirtsgestein
	Quellen des Bentonits
	Lösungszutritt ins Grubengebäude
	Kanalisation in Dichtelementen
	Permeabilität
	Porosität
	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
	Sonstige Verschlussbauwerke
	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
	Streckenverschlüsse
	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
	Schachtverschlüsse
	Ausfall eines Dichtpfropfens

### 6.1.2.18 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Das FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: Wirtsgestein.

Bezüglich der Ausprägung werden im Folgenden ausschließlich schon bestehende Klüfte betrachtet. Klüfte, die sich in der Nachverschlussphase des Endlagers bilden, werden im FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* behandelt.

#### Sachlage

Klüfte sind in jedem Salzstock in den Grenzbereichen von kompetenten und inkompetenten (z. B. Zechstein 2/Zechstein 3-Grenzbereich) bzw. in den kompetenten Salzgesteinen selbst (z. B. Hauptanhydrit) vorhanden. Auch im Salzstock Gorleben wurden Klüfte nachgewiesen, die i. d. R. verheilt sind und sich vor allem im Infrastrukturbereich des Erkundungsbergwerkes, insbesondere im z3-Umfeld der Kaliflöz-Aufdomung, befinden.

#### Weniger wahrscheinliche Ausprägung

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Störungen und Klüfte betreffen deren Eigenschaften, wie Kluftweite, -reichweite und -vernetzung. Aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen ergeben sich drei alternative Möglichkeiten für im Referenzszenarium nicht betrachtete Wegsamkeiten im z3:

- Die Existenz von Verbindungen von im Referenzszenarium als voneinander isoliert betrachteten Klüften im z3. Dies bedeutet, dass die Kluftbereiche in zwei durch Steinsalz getrennten Anhydritschollen verbunden sein können, so dass als weniger wahrscheinliche Ausprägung bei einem Zutritt von Lösungen aus diesen Kluftbereichen die Lösungsmenge gegenüber dem Referenzszenarium erhöht ist.
- Eine zusätzliche Verbindung einer geklüfteten Anhydritscholle mit dem Infrastrukturbereich. Im Referenzfall wird angenommen, dass eine Verbindung des Kluftbereichs in einer einzelnen Anhydritscholle mit dem Infrastrukturbereich entsteht und sich der eventuell in den Klüften befindliche Lösungsinhalt in den Infrastrukturbereich ergießt. Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird angenommen, dass dies an zwei unterschiedlichen Stellen des Infrastrukturbereichs erfolgen kann.

- Die Existenz unerkannter Klüftbereiche um Dichtelemente des Schachtverschlusses.

Eine unwahrscheinliche Ausprägung des FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* ist eine Verbindung von Klüften im z3 in der Art, dass sich Wegsamkeiten bis hin zu wasserführenden Schichten des Deck- und Nebengebirges ergeben. Die Existenz von hydraulisch wirksamen Klüften im Hauptsalz des z2 wird ebenfalls als unwahrscheinlich eingestuft.

### Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.13).

**Tab. 6.13** Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
Beeinflusste FEP	Diffusion
	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein
	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
	Wirtsgestein
	Lösungszutritt ins Grubengebäude
	Permeabilität
	Matrixdiffusion
	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* führen je nach den oben angegebenen drei Möglichkeiten zu unterschiedlichen Auswirkungen. In den ersten beiden Fällen kann es durch eine Verbindung von zwei als unabhängig betrachteten Lösungsreservoirs im z3 zu einem größeren gemeinsamen Reservoir kommen, bzw. zu einem Lösungszutritt aus dem Lösungsreservoir in den Infrastrukturbereich. Diese beiden Möglichkeiten führen daher vor allem zu einer veränderten Ausprägung der beiden FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* und *Lösungszutritt ins Grubengebäude*.

Die dritte betrachtete, weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer Veränderung der entsprechenden Eigenschaften der Schachtverschlüsse. Dies betrifft auch jene Eigenschaften, die Transportvorgänge durch die Verschlussbauwerke bestimmen, wie deren integrale Permeabilität.

Obwohl die Abweichungen vom Referenzszenarium zu alternativen Entwicklungsmöglichkeiten führen, werden sie nicht in zusätzlichen Alternativszenarien betrachtet. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP betreffend der Lösungsreservoirs durch die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* abgedeckt. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung bezüglich des Schachtverschlusses wird in dem repräsentativen Alternativszenarium A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ berücksichtigt.

#### **6.1.2.19 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung**

Das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* beeinträchtigt folgende Initial-Barrieren: „Wirtsgestein“, „Streckenverschlüsse“, „Schachtverschlüsse“ und „Brennelement-Behälter“.

##### **Sachlage**

Die Erfahrungen im Erkundungsbergwerk Gorleben zeigen, dass bei der Auffahrung der Grubenbaue Sekundärspannungen an der Hohlraumkontur auftreten. Durch die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und dem daraus resultierenden Wärmeeintrag in das umgebende Gebirge wird es zur thermischen Expansion bzw. bei der späteren Abkühlung zur Kontraktion des Gebirges kommen. Dabei werden Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge auftreten. Weiterhin sind während der Nachverschlussphase mögliche Beanspruchungen des Gebirges und der geotechnischen Bauwerke durch den Fluiddruck zu berücksichtigen. Spannungsänderungen im Salzgebirge werden sich in Zukunft auch durch geänderte Auflasten (z. B. Gletscherüberfahung, Sedimentation, Erosion) ergeben.

##### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Die Ausprägung der Spannungsänderung und Spannungsumlagerung wird in geomechanischen Rechnungen ermittelt. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP ergibt sich aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen seiner auslösenden und

beeinflussenden FEP, die für das Referenzszenarium im Anhang A beschrieben sind. Für die auslösenden und beeinflussenden FEP, die Initial-Barrieren direkt beeinträchtigen, wie z. B. *Fluiddruck*, *Konvergenz* oder *Glaziale Rinnenbildung*, sind die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen in den entsprechenden Abschnitten beschrieben. Für die Eisauflast ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung zu betrachten, da im Referenzszenarium R1 bereits ein repräsentativer Bereich bis 1.500 m berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 5.2.3). Von den anderen FEP werden die klimatischen FEP mit Inlandvereisung und die *Thermische Expansion und Kontraktion* als Folge der *Wärmeproduktion* als maßgeblich für eine weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* angesehen. Dabei sind weniger wahrscheinliche Randbedingungen zur Temperaturentstreuung zu betrachten.

### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Die Abweichungen vom Referenzszenarium bezüglich der Spannungsänderung und Spannungsumlagerung durch die Temperaturentstreuung sind in einem Alternativszenarium A1i5 zu betrachten.

#### **6.1.2.20 Fluidvorkommen im Wirtsgestein**

Das FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: Wirtsgestein.

#### **Sachlage**

Am Standort Gorleben wurden im Verlauf der über- und untertägigen Erkundung an mehreren Lokalisationen Lösungsvorkommen festgestellt und detailliert dokumentiert sowie chemisch analysiert. Die bis zum Beginn des Erkundungsstopps im September 2000 insgesamt festgestellten 666 m<sup>3</sup> Lösung sind nicht beliebig im Salzstock verteilt, sondern an bestimmte stratigraphische Horizonte mit einer dafür geeigneten mineralogischen Zusammensetzung und strukturellen Ausbildung gebunden. Bei der bisherigen Erkundung des Standortes Gorleben wurden Lösungs- und Gaszutritte hauptsächlich in den anhydritischen Gesteinen der Leine-Folge (z3) angetroffen, in denen kluft- oder schichtgebundene Speicherräume möglich sind. Die größten Lösungsvolumina (im Zeitraum 1980 bis 2000) sind aus der Gorleben-Bank (z3OSM) mit insgesamt 261 m<sup>3</sup> und aus dem Hauptanhydrit (z3HA) mit insgesamt 250 m<sup>3</sup> zugetreten.

## Weniger wahrscheinliche Ausprägung

Im Referenzszenarium werden als wahrscheinliche Ausprägung einzelner Lösungsvorkommen im z3 mit maximal 5.100 m<sup>3</sup> Volumen angenommen.

Im FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* wurden als weniger wahrscheinliche Ausprägungen angenommen, dass zum einen zwei Fluidvorkommen mit der Größe der wahrscheinlichen Ausprägung als verbunden betrachtet werden können, sowie zum anderen, dass zwei Fluidvorkommen mit der Größe der wahrscheinlichen Ausprägung an unterschiedlicher Stelle zum Infrastrukturbereich zutreten können. Aufgrund beider Annahmen ergibt sich als weniger wahrscheinliche Ausprägung, dass insgesamt eine Lösungsmenge von 10.200 m<sup>3</sup> in den Infrastrukturbereich zutritt. Die Lösungsmenge von 10.200 m<sup>3</sup> deckt auch die weniger wahrscheinliche Ausprägung eines einzelnen Fluidvorkommens ab.

## Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.14).

**Tab. 6.14** Fluidvorkommen im Wirtsgestein: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
Beeinflusste FEP	Thermochemische Sulfatreduktion
	Thermomigration
	Wirtsgestein
	Radiolyse
	Gasmenge im Grubenbau
	Lösungszutritt ins Grubengebäude

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* führt zu einem verstärkten Lösungszutritt ins Grubengebäude. Da die Fluidvorkommen im Allgemeinen neben Lösungen auch Gase enthalten, erhöht sich zusätzlich die Gasmenge im Grubenbau.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i6 zu betrachten.

### **6.1.2.21 Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein**

Das FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Wirtsgestein“.

#### **Sachlage**

Gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe (KW) gehören zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen. Die Verteilung von KW innerhalb von Salzlagerstätten gehorcht strukturgeologischen, mit der Genese und dem internen Aufbau der Salzstruktur zusammenhängenden Gesetzmäßigkeiten. Am Standort Gorleben wurden in den Schachtvorbohrungen Go 5001 und Go 5002 im z3BK/z3BD und im z3OS geringe Mengen an flüssigen und gasförmigen KW erbohrt. Weitere Vorkommen von KW wurden beim Auffahren des Infrastrukturbereichs sowie im Erkundungsbereich EB1 als nestartig angeordnete, jedoch volumenmäßig geringe Kondensatzutritte mit intensivem KW-Geruch in den Querschlägen 1 West und 1 Ost und beim Stoßen der Erkundungsbohrungen 02YER02 RB032, 02YEQ01 RB119, 02YEQ01 RB120 und 02YER20 RB500 angetroffen. Die Kondensat-Vorkommen in den Querschlägen des EB1 liegen isoliert voneinander im Bereich des ältesten Hauptsalzes (Knäuelsalz) bzw. in sehr geringer Anzahl im Bereich der unscharfen Grenze zwischen Knäuel- und Streifensalz. Weitere Vorkommen wurden im Bereich des Streifensalzes in den Bohrorten 1.2 und 3 an der S-Flanke des Hauptsalzsattels beobachtet.

#### **Weniger wahrscheinliche Ausprägung**

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* sind zum einen ein im Vergleich zum Referenzszenarium höherer Grad der Imprägnierung mit Kohlenwasserstoffen in den betroffenen Bereichen und zum anderen eine größere Häufigkeit der betroffenen Bereiche anzunehmen.

#### **Abweichung vom Referenzszenarium**

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.15).

Im Hinblick auf die Einwirkung auf die Initial-Barriere „Wirtsgestein“ sind durch eine weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* die Änderungen der Ausprägung der Wirtsgesteinseigenschaften und der

thermochemischen Sulfatreduktion zu betrachten. Auswirkungen auf die Wirtsgesteinseigenschaften werden geomechanisch als nicht relevant im Hinblick auf dessen Integrität angesehen. Auswirkungen im Hinblick auf die Ausprägung der thermochemischen Sulfatreduktion werden in dem entsprechenden FEP berücksichtigt.

**Tab. 6.15** Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
<b>Beeinflusste FEP</b>	Geochemisches Milieu im Grubenbau
	Zersetzung von Organika
	Mikrobielle Prozesse im Grubenbau und im Salzstock
	Gasmenge im Grubenbau
	Wirtsgestein
	Thermochemische Sulfatreduktion
	Kolloide
	Radiolyse

### 6.1.2.22 Thermochemische Sulfatreduktion

Das FEP *Thermochemische Sulfatreduktion* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Wirtsgestein“.

#### Sachlage

Als natürlicher Bestandteil von Evaporiten kommt auch im geplanten Einlagerungsbereich des Salzstocks Gorleben Anhydrit (Calciumsulfat  $\text{CaSO}_4$ ) vor. Im für die Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle vorgesehenen Hauptsalz der Staßfurt-Folge treten mittlere Anhydritgehalte von 2 Vol.-% bis 8 Vol.-% auf, bei abnehmender Tendenz vom Liegenden zum Hangenden. Die Anhydrite sind im Hauptsalz sehr unregelmäßig verteilt, nur sehr lokal begrenzt werden erhöhte Anhydritgehalte beobachtet, die in Einzelproben bis zu 20 Vol.-% ausmachen. Bei einer Erhöhung der Temperatur und Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen bzw. molekularem Wasserstoff kann es zur thermochemischen Reduktion des Sulfats kommen. Nachgewiesen ist dieser Prozess über geologische Zeiträume für Temperaturen ab 80 °C bis 100 °C. Durch die anfängliche Temperaturerhöhung im Einlagerungsbereich, die mögliche nestartige Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen sowie die möglicherweise bei Anwesenheit von Wasser

(fluid inclusions, Restwässer aus dem Versatz) durch Metallkorrosion verursachte Produktion von molekularem Wasserstoff liegen im Hauptsalz über einen begrenzten Zeitraum Voraussetzungen für den Ablauf des Prozesses der thermochemischen Sulfatreduktion vor.

### Weniger wahrscheinliche Ausprägung

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion* wird unter Berücksichtigung der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* angenommen, dass größere Anteile der im Salzgestein vorhandenen Sulfatmengen thermochemisch umgewandelt werden können.

### Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP (Tab. 6.16).

**Tab. 6.16** Thermochemischen Sulfatreduktion: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	Gasbildung
Beeinflusste FEP	Versatz
	Sonstige Verschlussbauwerke
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
	Ausfall eines Dichtpfropfens
	Lösungen im Grubenbau
	Geochemisches Milieu im Grubenbau
	Zersetzung von Organika
	Wirtsgestein
	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
	Komplexbildung
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion* führt mit Blick auf die Initial-Barrieren vor allem zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Salze im Wirtsgestein selbst, zu einer nicht thermisch induzierten Volumenänderung von Materialien zur Gasbildung und zur Änderung des geochemischen Milieus. Das Ausmaß der Auswirkungen und ob dadurch eine Abweichung vom Referenzszenarium vorliegt, kann nur in der Integritätsanalyse ermittelt werden. Kann die Integrität des Wirtsgesteins gezeigt werden, sind die Konsequenzen die gleichen wie im Referenzszenarium. Falls die Integrität nicht gezeigt werden kann oder relevante Änderungen des geochemischen Milieus auftreten, sind die ermittelten Auswirkungen auch in der radiologischen Konsequenzenanalyse zu berücksichtigen.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i7 zu betrachten.

#### **6.1.2.23 Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein**

Das FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* beeinträchtigt folgende Initial-Barriere: „Wirtsgestein“.

##### **Sachlage**

Das Salzgestein am Standort ist für Fluide praktisch dicht. Sollte der Gasdruck in einem Grubenbau über den Gebirgsdruck steigen wird aufgrund von Untersuchungsergebnissen die Erhöhung der lokalen Permeabilität des Salzgesteins erwartet. Das bedeutet, dass bei einem Anstieg des Gasdruckes in einem Einlagerungsbereich im Bereich des Gebirgsdruckes alle darauf hin gebildeten Gase in das Salzgestein (hier: Steinsalz) abfließen und dort gespeichert werden. Die Permeabilitätserhöhung des Steinsalzes ist abhängig von der Differenz zwischen Gasdruck und minimaler Hauptspannung im Gebirge und kann mehrere Größenordnungen umfassen. Das Steinsalz wird durch den Gasfluss nicht geschädigt, solange der Gasdruck nicht die hydraulische Aufreißfestigkeit übersteigt. Sinkt der Gasdruck wieder unter den Gebirgsdruck, so wird die ursprüngliche Gaspermeabilität des ungestörten Steinsalzes wieder hergestellt.

### Weniger wahrscheinliche Ausprägung

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* wird betrachtet, dass die Gasinfiltration bereits bei einem niedrigeren Druck als dem lithostatischen Druck in das Salzgestein hinein möglich ist. Als Schwellwert für den Beginn der Gasinfiltration wird ein Wert von 2 MPa unterhalb des lokalen lithostatischen Drucks angenommen.

### Abweichung vom Referenzszenarium

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner beeinflussten FEP (Tab. 6.17).

**Tab. 6.17** Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	keine
Beeinflusste FEP	Gasmenge im Grubenbau
	Fluiddruck

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* führt zu einer Verringerung der Gasmenge im Grubenbau und des Fluiddrucks. Bei Erreichen des Schwellwertes zur Gasinfiltration in das Wirtsgestein sind die Auswirkungen der druckgetriebenen Infiltration von Fluiden in das Salzgestein in radiologischen Konsequenzenanalysen zu ermitteln.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A1i8 zu betrachten.

#### 6.1.2.24 Zusammenfassung

Aus dem FEP-Katalog ergeben sich 23 wahrscheinliche FEP mit einer direkten Beeinträchtigung der Initial-Barrieren, auf denen das Referenzszenarium basiert. In Kapitel 6.1.2 wurden Alternativszenarien durch die Berücksichtigung und Bewertung der weniger wahrscheinlichen Ausprägungen dieser 23 Initial-FEP abgeleitet. Es wurde gezeigt, für welche der 23 FEP die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen zu zusätzlich zu

berücksichtigenden alternativen Entwicklungsmöglichkeiten führen. Dabei ergaben sich vier mögliche Auswirkungen:

1. Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des Initial-FEP führen zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems, die in einem Alternativszenarium berücksichtigt werden.
2. Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des Initial-FEP führen zwar zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems, die Auswirkungen werden aber durch ein anderes Alternativszenarium repräsentiert.
3. Für Initial-FEP kann eine Ausprägung angegeben werden, jedoch ist eine Zuordnung zu einer Wahrscheinlichkeit nicht möglich. Es wird in diesem Fall im Referenzszenarium eine für die Zwecke der Szenarientwicklung repräsentative Ausprägung angegeben. Diese Initial-FEP führen zu keiner alternativen Entwicklungsmöglichkeit.
4. Es ergibt sich kein Alternativszenarium, da die betrachteten Initial-FEP per se keine Ausprägung haben, sondern sich diese erst in den jeweiligen Prozess- und Konsequenzenanalysen ergibt.

In Tab. 6.18 ist für die 23 Initial-FEP angegeben, zu welchen der genannten Kategorien sie zugerechnet werden. Bei neun FEP führen die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen zu zusätzlichen Szenarien. Acht FEP werden von anderen Alternativszenarien und drei vom Referenzszenarium repräsentiert. Bei den FEP, deren weniger wahrscheinliche Ausprägungen von einem anderen Alternativszenarium abgedeckt werden, ist das repräsentative Szenarium in sechs Fällen das „Vorzeitige[s] Versagen eines Strecken- oder Schachtverschlusses“.

**Tab. 6.18** Szenarien aus Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen

Bezug	Nr.	FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte Initial-Barrieren*
Alternativszenarium	A1i1	1.3.05.03	Glaziale Rinnenbildung	WG, SchV
	A1i2	2.1.03.03	Versagen eines Brennelement-Behälters	BEB
	A1i3	2.1.07.01	Konvergenz	SchV, StrV
	A1i4	2.1.09.03	Metallkorrosion	BEB
	A1i5	2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	WG, SchV, StrV, BEB
	A1i6	2.2.07.01	Fluidvorkommen im Wirtsgestein	WG
	A1i7	2.2.10.05	Thermochemische Sulfatreduktion	WG
	A1i8	2.2.11.01	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	WG
	A1i9	1.2.09.02	Subrosion	WG, SchV
Durch anderes Alternativszenarium repräsentiert	A1w1, A1w2	2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV
	A1w1	2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV
	A1w1	2.1.08.08	Quellen des Bentonits	SchV
	A1w1, A1w2	2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV
	A1i2, A1i4	2.1.09.07	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	BEB
	A1w1, A1w2	2.2.01.01	Auflockerungszone	SchV, StrV
	A1i6, A1i2	2.2.02.02	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	WG
	A1i7	2.2.07.02	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	WG
Durch Ref.-szenarium repräsentiert	R1	1.2.03.01	Erdbeben	WG, SchV, StrV
	R1	1.2.09.01	Diapirismus	WG, SchV, StrV
	R1	1.3.04.02	Bildung kryogener Klüfte	WG
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

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

### **6.1.3 Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes**

Zur Festlegung des Referenzszenariums werden neben den FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren zusätzlich die FEP *Radionuklidmobilisierung*, *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* und *Radionuklidtransport in der Gasphase* sowie ihre auslösenden und beeinflussenden FEP betrachtet. Im Folgenden werden die zu berücksichtigenden alternativen Entwicklungsmöglichkeiten, die sich aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP in Wechselwirkung mit den o. g. FEP ergeben, dargestellt.

Das eingelagerte Inventar der Radionuklide hat hinsichtlich des Mengengerüsts keine weniger wahrscheinliche Ausprägung über die Ungewissheiten bzw. Bandbreiten im Referenzszenario hinaus. Allerdings ist eine weniger wahrscheinliche Ausprägung denkbar für die chemische Form, in der die Radionuklide im Abfall vorliegen. Ein Beispiel hierfür ist der Anteil an gasförmigen bzw. leicht zu mobilisierenden Radionukliden. Solche weniger wahrscheinlichen Ausprägungen sind zu berücksichtigen.

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen des FEP *Lösungen im Grubenbau* hinsichtlich der Menge sind für eine Radionuklidmobilisierung vor allem in Bezug auf die Gasbildung und den Behälterausfall durch Korrosion zu betrachten. Während der Behälterausfall eine direkte Mobilisierung zur Folge hat, können die gebildeten nicht radioaktiven Gase den Transport für die radioaktiven Gase signifikant beeinflussen.

Das geochemische Milieu ergibt sich aus den eingebrachten Materialien, den Fluiden im Grubenbau sowie den ablaufenden chemischen Prozessen. Weniger wahrscheinliche Ausprägungen können für das geochemische Milieu nicht angegeben werden, vielmehr ergibt sich die Bandbreite aus den Ungewissheiten über die Mengen, die Zusammensetzung und die Verteilung der eingebrachten Stoffe. Ein entsprechendes geochemisches Milieu könnte die Korrosion der Metall- oder Betonbehälter und der Zement-Abfallmatrix intensivieren und damit die Radionuklidmobilisierung beeinflussen.

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Korrosion von Glas ergeben sich aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des geochemischen Milieus und der verfügbaren Lösungsmengen und sind daher nicht separat zu betrachten.

Die Zersetzung von Organika betrifft hinsichtlich der Mobilisierung vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle im Westflügel und in geringerem Maß auch die eventuell aktivierten Abschirmmaterialien (PE) der POLLUX und CASTOR-Behälter im Ostflügel. Eine weniger wahrscheinliche Ausprägung der Zersetzung und somit der Mobilisierung aus diesen Abfällen ist zu betrachten und bei einer möglichen Freisetzung gasförmiger Radionuklide zu berücksichtigen.

Für die FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters, Metallkorrosion, Materialver- sprödung durch Wasserstoffaufnahme* und *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* wurden die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen bereits behandelt, da diese FEP mindestens eine Initial-Barriere direkt beeinträchtigen. Der Radionuklid- transport wird durch den Ausfall eines Dichtpfropfens infolge der Korrosion von Sorel- phasen beeinflusst. Im Hinblick auf die Radionuklidmobilisierung ist das FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* außerdem relevant für den Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters und die Korrosion der Zement-Abfallmatrix.

Bezüglich des Radionuklidtransports müssen keine weniger wahrscheinlichen Ausprä- gungen angenommen werden. Diese sind durch die weniger wahrscheinlichen Ausprä- gungen der bei der Mobilisierung genannten FEP abgedeckt. Die eigentlichen physika- lischen Transportprozesse selbst haben keine weniger wahrscheinliche Ausprägung.

Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der auslösenden und beeinflussenden FEP des FEP *Radionuklidmobilisierung* können zu einer alternativen Entwicklungs- möglichkeit gegenüber dem Referenzszenarium oder den in dem vorangegangenen Kapitel bereits definierten Alternativszenarien führen. Diese alternative Entwicklungs- möglichkeit ist in einem zusätzlichen Alternativszenarium A1m1 zu untersuchen.

#### **6.1.4 Weniger wahrscheinliche FEP**

Die Darstellung im vorliegenden Kapitel orientiert sich an der Beschreibung des Refe- renzszenariums für die Einlagerungsvariante AB1 (Kapitel 5.2), das – wie alle Refe- renzszenarien – auf der Betrachtung **wahrscheinlicher** FEP mit direkter Beeinträchti- gung einer Initial-Barriere beruht. Im vorliegenden Kapitel werden Alternativszenarien dargestellt, die auf der zusätzlichen Betrachtung jeweils eines **weniger wahrscheinli- chen** FEP basieren.

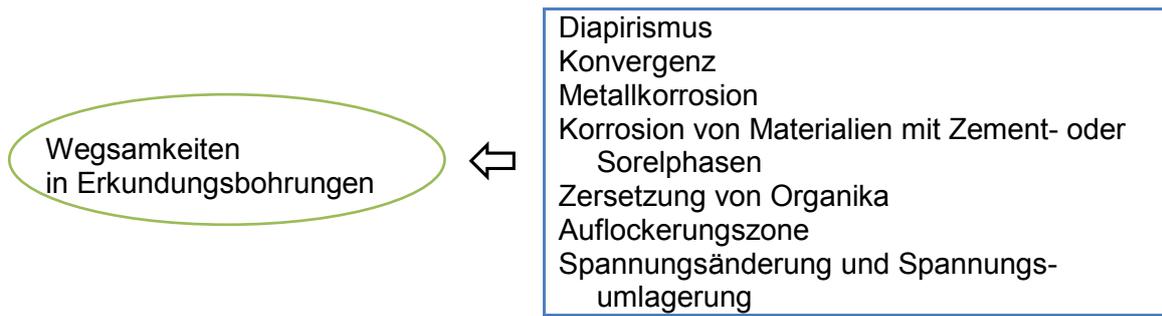
Für die in Tab. 3.2 aufgeführten weniger wahrscheinlichen FEP wird in den folgenden Kapiteln zunächst in knapper Form dargestellt, wodurch das jeweilige FEP beeinflusst wird. Für eine vertiefte Information sind alle beeinflussenden FEP im Anhang B ausführlich zusammengestellt. Anschließend werden in jedem Unterkapitel die Auswirkungen anhand der resultierenden bzw. beeinflussten FEP diskutiert, um die Auswirkungen auf die Systementwicklungsmöglichkeiten zu identifizieren. Aus den Ergebnissen wird entweder ein Alternativszenarium abgeleitet oder darauf hingewiesen, in welcher Form diese Ergebnisse im Rahmen der bereits abgeleiteten Szenarien zu behandeln sind. In Kapitel 6.1.4.6 werden die resultierenden Alternativszenarien beschrieben und in Kapitel 6.1.4.7 die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

#### **6.1.4.1 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen**

Erkundungsbohrungen sind wie die Grubenbaue des Endlagerbergwerks anthropogene Eingriffe in das Wirtsgestein oder das Deck- und Nebengebirge. Sofern sie mit dem Grubengebäude des Endlagers direkt verbunden sind, werden sie als Teil des Grubengebäudes betrachtet, obwohl sie beispielsweise wegen ihres sofortigen Verschlusses bei der Berechnung der Hohlraumvolumina nicht berücksichtigt werden. Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen im Umfeld des Endlagerbergwerks wirken direkt auf die Barriere Wirtsgestein. Sie sind in allen Teilsystemen mit Ausnahme des Nahfelds zu berücksichtigen, da keine Erkundungsbohrungen in das Nahfeld hinein vorgesehen sind.

Es werden vier verschiedene Typen von Erkundungsbohrungen mit unterschiedlicher Zielsetzung gestoßen (Anhang D). Von über Tage erfolgten hydrogeologische Bohrungen, Salzspiegelbohrungen und Tiefbohrungen zur Charakterisierung des Deck- und Nebengebirges und zu einer ersten Übersicht über den Aufbau des Salzstocks. Von unter Tage werden Erkundungsbohrungen gestoßen, um detaillierte Informationen über den Internbau des Salzstocks zu liefern. Alle Arten von Erkundungsbohrungen werden in der Nachverschlussphase als anforderungsgerecht erfüllt angesehen (siehe auch Anhang D).

Im Folgenden wird angenommen, dass in einer Erkundungsbohrung eine Wegsamkeit auftritt. Die Ausprägung dieser Wegsamkeit wird von den in Abb. 6.2 angegebenen FEP beeinflusst (siehe auch deren detaillierte Beschreibung im Anhang B).



**Abb. 6.2** Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: beeinflussende FEP

#### 6.1.4.1.1 Beeinflusste FEP

Im Folgenden werden die von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen beeinflussten FEP diskutiert (siehe die Zusammenstellung in Tab. 6.19). Es gibt keine resultierenden FEP.

**Tab. 6.19** Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: beeinflusste FEP

<b>Beeinflusste FEP</b>	Lösungszutritt ins Grubengebäude
	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

Eine Wegsamkeit in einer Erkundungsbohrung kann ggf. einen Lösungszutritt ins Grubengebäude ermöglichen, verändern oder vergrößern. Von wesentlichem Einfluss ist dabei der Zutrittsort im Grubengebäude.

Durch eine Wegsamkeit in einer Erkundungsbohrung kann der Strömungswiderstand in einem Bereich des Grubengebäudes erniedrigt sein, falls die Erkundungsbohrung zwei Grubenbaue miteinander verbindet. Diese Verbindung kann prinzipiell auch zwischen Grubenbauen der Erkundungs- und der Einlagerungssohle sein. Außerdem können die Wegsamkeiten bis in Bereiche des Salzgesteins innerhalb des Sicherheitsabstands zu den potenziell wasserführenden Schichten reichen.

Die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen bezieht sich auf das Verfüllmaterial der Erkundungsbohrungen und ist für die Betrachtung der Auswirkungen

des FEP relevant, da sich der Strömungswiderstand in der Bohrung zeitlich ändern kann.

Im Deck- und Nebengebirge können die Grundwasser- und Gasströmung durch eine Wegsamkeit in einer Erkundungsbohrung geändert werden, z. B. wenn unterschiedliche Grundwasserleiter durch die Bohrung verbunden werden und dadurch ein schneller vertikaler Transport durch diese Wegsamkeit möglich ist.

#### **6.1.4.1.2 Bewertung des FEP**

Folgende Arten von Erkundungsbohrungen sind zu betrachten (siehe auch Anhand D):

- Hydrogeologische Bohrungen,
- Salzspiegelbohrungen,
- Tief- und Schachtvorbohrungen und
- Erkundungsbohrungen unter Tage.

Aus den ersten drei aufgeführten Arten von Erkundungsbohrungen sind keine Alternativszenarien abzuleiten, denn sie sind entweder nicht mit dem Grubengebäude des Endlagers in Verbindung (Hydrogeologische Bohrungen, Salzspiegelbohrungen und Tiefbohrungen, die weit entfernt vom Grubengebäude gestoßen wurden) oder sie dienten als Vorbohrungen für die Schächte und sind damit inzwischen nicht mehr vorhanden.

Für Erkundungsbohrungen unter Tage sind drei Fälle zu betrachten:

1. Erkundungsbohrungen zwischen der Erkundungs- und der Einlagerungssohle. Wegsamkeiten in diesen Erkundungsbohrungen können durch Festlegungen und entsprechende Qualitätssicherung in der Erkundungsphase ausgeschlossen werden. Das heißt, Bohrungen von der Erkundungssohle in den Einlagerungshorizont müssen einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu den zukünftigen Grubenbauen auf der Einlagerungssohle einhalten. Bereits existierende Bohrungen werden bei der Endlagerplanung berücksichtigt, indem die Grubenbaue der Einlagerungssohle so aufgeföhren werden, dass sie einen ausreichenden Abstand zu diesen Erkundungsbohrungen aufweisen. In diesem Fall ist kein Alternativszenarium zu betrachten.

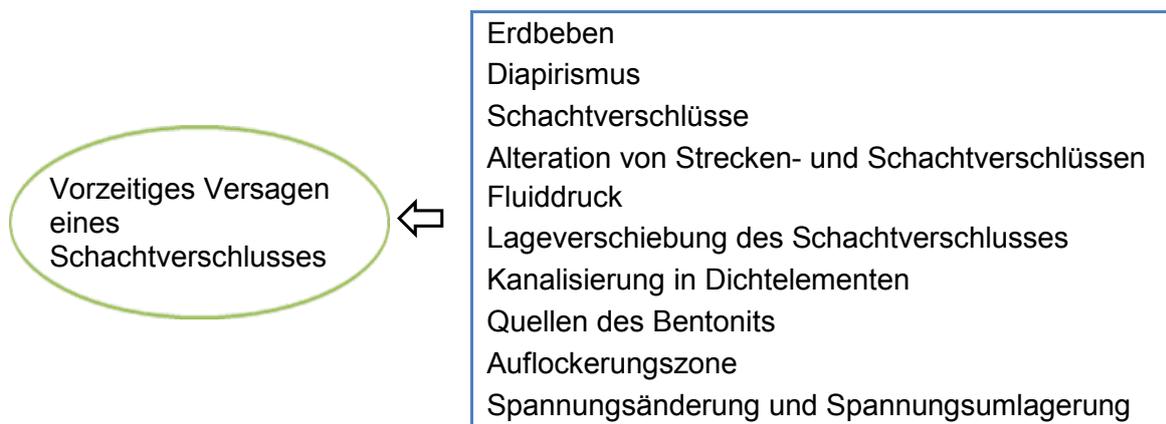
2. Erkundungsbohrungen auf der Einlagerungssohle, die bis in Gebirgsbereiche reichen können, die durch den Sicherheitsabstand zwischen dem Grubengebäude und den potenziell wasserführenden Schichten (z. B. Anhydrit) gegeben sind, z. B. eine Vorbohrung einer Richtstrecke der Einlagerungssohle. Wegsamkeiten in diesen Erkundungsbohrungen können den Abstand zwischen einem Grubenbau und potenziell wasserführenden Schichten verringern und dadurch zu einem Alternativszenarium führen. In diesem Fall wird der Sicherheitsabstand geringfügig verringert, da die Vorbohrungen nur eine geringe Länge haben und keinesfalls den gesamten Sicherheitsabstand überbrücken. Es ist von Verringerungen des Abstands von wenigen Metern auszugehen. Dieser Fall wird durch das Alternativszenarium A1a3 repräsentiert (Kapitel 6.1.1.3) und daher hier nicht weiter betrachtet.
3. Erkundungsbohrungen, die zwei Grubenbaue miteinander verbinden. Wegsamkeiten in solchen Erkundungsbohrungen sind nicht weiter zu betrachten, da innerhalb der Einlagerungsfelder nur Erkundungsbohrungen im vorgesehenen Streckenverlauf gestoßen werden und außerhalb der Einlagerungsfelder die Konsequenzen solcher Wegsamkeiten wegen der geringen potenziellen Strömungsquerschnitte nicht relevant sind. Eine Wegsamkeit entlang einer bereits existierenden Bohrung zwischen den Infrastrukturbereichen der Einlagerungs- und Erkundungssohle würde zu einem Umfließen des unteren Dichtelements des Schachtverschlusses führen und wird vom Alternativszenarium A1w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ repräsentiert.

#### **6.1.4.2 Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses**

Die Schachtverschlüsse sind für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt /MÜL 12a/. Ein vorzeitiges Versagen dieser Verschlüsse ist weniger wahrscheinlich. In einem solchen Fall kann es frühzeitig zu einem Zufluss von Deckgebirgslösungen über diesen Schachtverschluss in den Infrastrukturbereich des Grubengebäudes kommen. In Abb. 6.3 sind die FEP zusammengestellt, die das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses beeinflussen und damit die Ausprägung des hier betrachteten Alternativszenariums bestimmen.

Obwohl ein Schachtverschluss mehrere Dichtelemente enthält (Abb. 4.4), bezieht sich das vorzeitige Versagen auf das Gesamtsystem, unabhängig davon, welches Dichtelement versagt oder in welchem Umfang und zu welchem Zeitpunkt das Dichtelement versagt. In den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird gefordert, dass die Sicherheit

des Endlagers auch für den Fall sicherzustellen ist, dass einzelne Barrieren ihre Funktion nicht voll entfalten. Mit den Auslegungsrechnungen für die Schachtverschlüsse wurde gezeigt /MÜL 12a/, dass jedes einzelne Dichtelement die Anforderungen an seine Funktionsdauer erfüllt, ein gleichzeitiges Versagen aller Dichtelemente also auszuschließen wäre. Bei demonstriertem Nachweis der funktionalen Unabhängigkeit der Dichtelemente ist ein gleichzeitiges Versagen aller Dichtelemente auszuschließen. Da dieser Nachweis bislang noch nicht geführt wurde, wird an dieser Stelle das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses, das heißt das gleichzeitige Versagen aller Dichtelemente, unterstellt.



**Abb. 6.3** Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: beeinflussende FEP

Das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ wird auch als repräsentativ für solche Szenarien verwendet, die auf FEP und Annahmen basieren, die bei der Entwicklung von anderen Alternativszenarien betrachtet werden (Kapitel 6.1.1 und Kapitel 6.1.2). In Tab. 6.20 sind diese FEP zusammengestellt.

Die Auswirkungen der FEP und Annahmen in Tab. 6.20 sind in Kapitel 6.1.1 und Kapitel 6.1.2 dargestellt. Bei der Festlegung der Alternativszenarien (Kapitel 6.1.4.2.2) wird darauf geachtet, dass diese Auswirkungen abdeckend berücksichtigt werden.

**Tab. 6.20** FEP und spezifische Annahmen, die anderweitig abgeleiteten Alternativszenarien zugrunde liegen, welche durch das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ repräsentiert werden

<b>FEP-Nr.</b>	<b>FEP-Bezeichnung/Annahme</b>	<b>Bezug</b>
2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Kapitel 6.1.2.7
2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	Kapitel 6.1.2.11
2.1.08.08	Quellen des Bentonits	Kapitel 6.1.2.12
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Kapitel 6.1.2.15
2.2.01.01	Auflockerungszone	Kapitel 6.1.2.17
2.2.02.02	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Kapitel 6.1.2.18
	Abweichung von der spezifischen Annahme zur anforderungsgerechten Errichtung der Schacht- und Streckenverschlüsse	Kapitel 6.1.1.2
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen	Kapitel 6.1.4.4

#### **6.1.4.2.1 Resultierende und beeinflusste FEP**

Im Folgenden werden die aus einem vorzeitigen Versagen eines Schachtverschlusses resultierenden und beeinflussten FEP diskutiert (Tab. 6.21).

Durch das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses ändern sich seine Eigenschaften, auch bezüglich der Alteration. Im Hinblick auf die Dichtwirkung des Schachtverschlusses sind außerdem die Porosität sowie die Lageverschiebung wichtige Aspekte. Von wesentlichem Einfluss auf das Wirtsgestein sind Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen, die sich aus den geänderten Verschlusseigenschaften, z. B. einem verringerten Stützdruck, ergeben. Als Konsequenz aller Beeinflussungen ändern sich die hydraulischen Durchlässigkeiten des Schachtverschlusses, insbesondere erhöht sich die integrale Permeabilität. Als Folge wird sich die Geschwindigkeit des Lösungszutritts ins Grubengebäude bzw. zunächst in den Infrastrukturbereich erhöhen.

Inwieweit sich die hydraulischen Verhältnisse ändern, hängt von den FEP ab, die das vorzeitige Versagen des Schachtverschlusses beeinflussen (siehe auch Abb. 6.3).

**Tab. 6.21** Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: resultierende und beeinflusste FEP

Resultierende FEP	Lösungszutritt ins Grubengebäude
<b>Beeinflusste FEP</b>	Schachtverschlüsse
	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
	Porosität
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

#### 6.1.4.2.2 Bewertung des FEP

Das FEP geht von einem vorzeitigen Versagen des Gesamtsystems „Schachtverschluss“ aus und ist weniger wahrscheinlich. In Bezug auf das Versagen bleibt der Aufbau des Schachtverschlusses, bestehend aus einer Reihe von Komponenten wie Widerlager und Dichtelemente, unberücksichtigt.

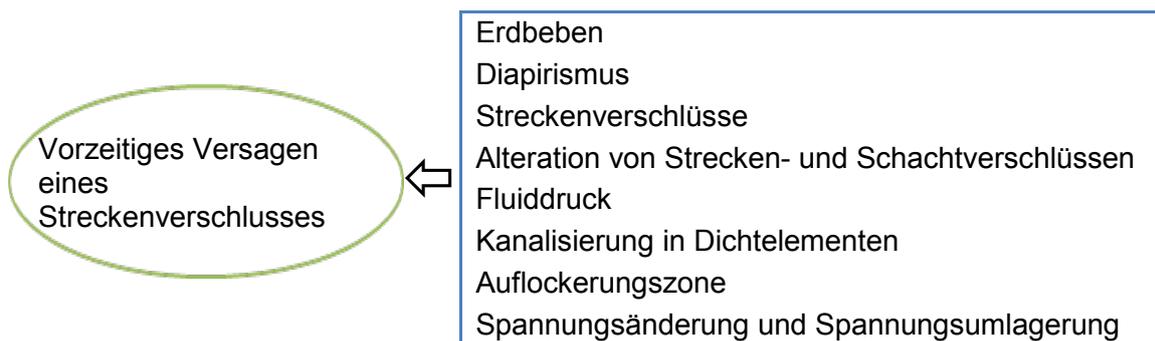
Durch das Versagen des Schachtverschlusses werden die hydraulischen Verhältnisse und damit der Lösungszutritt ins Grubengebäude beeinflusst. Das Alternativszenarium kann daher durch eine erhöhte integrale Permeabilität eines Schachtverschlusses abgebildet werden. Als mögliche Werte der dabei anzusetzenden Permeabilität können solche für Auflockerungszonen, Risse oder poröse Medien mit größerer Porosität herangezogen werden. Die Permeabilität der Dichtelemente des Schachtverschlusses (Tab.4.2) kann dabei gegenüber dem Referenzwert stark erhöht sein. Falls das vorzeitige Versagen des Schachtverschlusses durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerungszone oder durch das Entstehen einer Auflockerungszone abgebildet wird, ist auch das Verheilen dieser Auflockerungszone zu betrachten.

Je nach beeinflussendem FEP kann ein Schachtverschluss zu frühen oder späten Zeiten versagen. Daher sind in diesem Alternativszenarium zwei Versagenszeitpunkte zu betrachten. Die Variante mit frühem Versagen – zu Beginn der Nachverschlussphase – ist dabei für die meisten Entwicklungsmöglichkeiten abdeckend, da ein frühes Zutreten von Lösungen in den Infrastrukturbereich die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Lösungen bis in die Einlagerungsfelder vordringen. Da jedoch die Auswirkungen eines späten Versagens anders sein können als bei frühem Versagen (z. B. aufgrund des Aufbaus von Gaspolstern im Grubengebäude), ist auch eine Variante zu betrachten,

bei der der Schachtverschluss spät, aber noch vor dem Ende der vorgesehenen Funktionsdauer, versagt.

### 6.1.4.3 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Die Streckenverschlüsse sind als Gesamtbauwerk wie die Schachtverschlüsse (vgl. Kapitel 6.1.4.2) für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt /MÜL 12a/. Es ist weniger wahrscheinlich, dass einer dieser Verschlüsse vorzeitig versagt (vgl. Kapitel 4.2.1). Durch das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses kann es frühzeitig zu einem Kontakt von Lösungen im Infrastrukturbereich des Grubengebäudes mit Lösungen in den Richtstrecken der Einlagerungsbereiche kommen. In Abb. 6.4 sind die FEP zusammengestellt, die das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses beeinflussen.



**Abb. 6.4** Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: beeinflussende FEP

Mit den Auslegungsrechnungen für die Streckenverschlüsse wurde gezeigt /MÜL 12a/, dass das Gesamtsystem die Anforderungen an seine Funktionsdauer erfüllt. Bei demonstriertem Nachweis der funktionalen Unabhängigkeit der Dichtelemente ist ein gleichzeitiges Versagen beider Dichtelemente auszuschließen. Da dieser Nachweis bislang noch nicht geführt wurde, wird an dieser Stelle das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses, das heißt das gleichzeitige Versagen beider Dichtelemente unterstellt.

Das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ wird auch als repräsentativ für solche Szenarien verwendet, die auf FEP und Annahmen basieren, die bei der Entwicklung von anderen Alternativszenarien betrachtet werden („Alternativszenarien aus alternativen Betrachtungen zu spezifischen Annahmen“ sowie

„Alternativszenarien aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen wahrscheinlicher FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren“, Kapitel 6.1.1 und 6.1.2). In Tab. 6.22 sind diese FEP zusammengestellt.

**Tab. 6.22** FEP und spezifische Annahmen, die anderweitig abgeleiteten Alternativszenarien zugrunde liegen, welche durch das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ repräsentiert werden

FEP-Nr.	FEP-Bezeichnung/Annahme	Bezug
2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Kapitel 6.1.2.7
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Kapitel 6.1.2.15
2.2.01.01	Auflockerungszone	Kapitel 6.1.2.17
	Abweichung von der Annahme zur anforderungsgerechten Errichtung der Schacht- und Streckenverschlüsse	Kapitel 6.1.1.2
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen	Kapitel 6.1.4.4

Die Auswirkungen der FEP und Annahmen in Tab. 6.22 sind in Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 dargestellt. Bei der Festlegung der Alternativszenarien (Kapitel 6.1.4.3.2) wird darauf geachtet, dass diese Auswirkungen abdeckend berücksichtigt werden.

#### 6.1.4.3.1 Beeinflusste FEP

Im Folgenden werden die von einem vorzeitigen Versagen eines Streckenverschlusses beeinflussten FEP diskutiert (Tab. 6.23).

Durch das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses ändern sich seine Eigenschaften, z. B. die Porosität und die Alteration. Von wesentlichem Einfluss auf das Wirtsgestein sind Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen, die sich aus den geänderten Verschlusseigenschaften, z. B. einem verringerten Stützdruck, ergeben, und auf das Entstehen und Verheilen von Auflockerungszonen einwirken. Als Konsequenz aller Beeinflussungen kann sich die integrale Permeabilität des Streckenverschlusses erhöhen. Dadurch können sich die Strömungsvorgänge im Grubengebäude verändern.

**Tab. 6.23** Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: beeinflusste FEP

<b>Beeinflusste FEP</b>	Streckenverschlüsse
	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
	Porosität
	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Die Ausprägung der Änderung der hydraulischen Verhältnisse hängt von den FEP ab, die das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses beeinflussen (siehe auch Abb. 6.4). Insbesondere die Kanalisierung in Dichtelementen, die durch Risse oder andere Wegsamkeiten entstehen kann, beeinflusst die Strömungsvorgänge im Grubengebäude.

#### **6.1.4.3.2 Bewertung des FEP**

Ein vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses ist weniger wahrscheinlich. In Bezug auf das Versagen bleibt der Aufbau des Streckenverschlusses, bestehend aus drei Widerlagern und zwei Dichtelementen, unberücksichtigt.

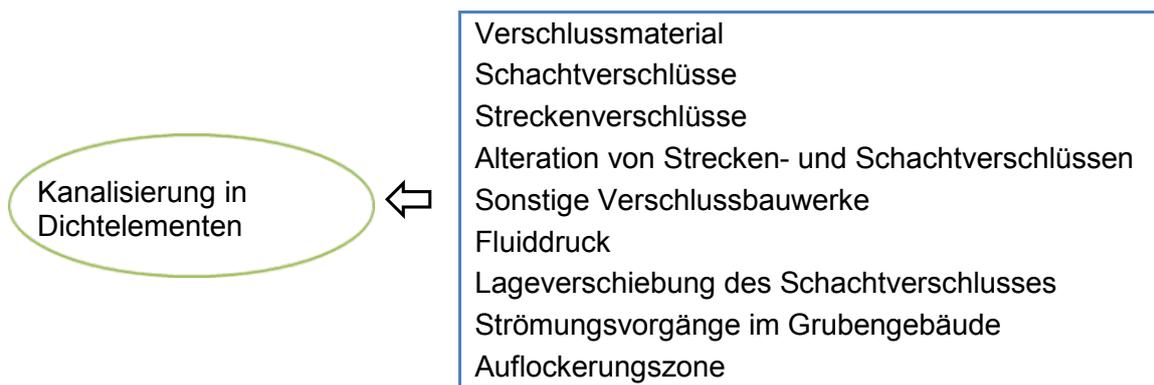
Durch das Versagen eines Streckenverschlusses werden die hydraulischen Verhältnisse und damit die Lösungsbewegung im Grubengebäude verändert. Das Alternativszenarium kann daher durch eine erhöhte integrale Permeabilität eines Streckenverschlusses abgebildet werden. Als mögliche Werte der dabei anzusetzenden Permeabilität können solche für Auflockerungszonen, für Risse oder für poröse Medien mit größerer Porosität herangezogen werden. Die integrale Permeabilität des Streckenverschlusses kann dabei gegenüber dem Referenzwert von  $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  unterschiedlich stark erhöht sein und dann in Folge zeitlich abnehmen. Falls das vorzeitige Versagen des Streckenverschlusses durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerungszone oder durch das Entstehen einer Auflockerungszone abgebildet wird, ist auch das Verheilen dieser Auflockerungszone zu betrachten.

Es ist ein Alternativszenarium mit drei Varianten zu betrachten. Die Varianten beziehen sich auf den Standort des betroffenen Streckenverschlusses: entweder im Ostflügel oder im Westflügel des Endlagers oder an der Kontaktstelle in der Richtstrecke zwischen den beiden Flügeln. Je nach beeinflussendem FEP kann ein Streckenverschluss zu frühen oder späten Zeiten versagen. Dabei wird jeweils ein frühes Versagen zu Be-

ginn der Nachverschlussphase als relevanter Fall unterstellt. Ein anderer Zeitpunkt des Eintretens kann ggf. untersucht werden, falls sich aus den Ergebnissen der Analysen Hinweise auf eine Zeitabhängigkeit ergeben.

#### 6.1.4.4 Kanalisierung in Dichtelementen

Unter Kanalisierung ist die Ausbildung von Fließwegen zu verstehen, auf denen sich ein Fluid bevorzugt ausbreitet. Die Kanalisierung wird von mehreren FEP beeinflusst, (Abb. 6.5). Das FEP hat direkte Auswirkungen auf die Strecken- und Schachtverschlüsse und kann zu dem vorzeitigen Versagen einzelner Dichtelemente führen (Kapitel 6.1.4.2 und 6.1.4.3). Alle anderen Auswirkungen, die sich aus den beeinflussten FEP ergeben, können zu diesen vorzeitigen Versagensfällen beitragen.



**Abb. 6.5** Kanalisierung in Dichtelementen: beeinflussende FEP

#### 6.1.4.4.1 Beeinflusste FEP

Die von einer Kanalisierung in Dichtelementen beeinflussten FEP sind in Tab. 6.24 zusammengestellt. Die FEP, die zu keinen zusätzlichen Alternativszenarien führen, sind grau dargestellt.

**Tab. 6.24** Kanalisierung in Dichtelementen: beeinflusste FEP

<b>Beeinflusste FEP</b>	Verschlussmaterial
	Schachtverschlüsse
	Streckenverschlüsse
	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
	Sonstige Verschlussbauwerke
	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
	Ausfall eines Dichtpfropfens
	Porosität
	Permeabilität
	Quellen des Bentonits

Von den in Tab. 6.24 angegebenen FEP sind nur die FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* bezüglich eines Alternativszenariums relevant. Da alle Auswirkungen dieser FEP von den an anderer Stelle behandelten Alternativszenarien repräsentiert werden (vgl. Kapitel 6.1.4.2 und 6.1.4.3), wird auf eine ausführliche Diskussion der beeinflussten FEP an dieser Stelle verzichtet.

#### 6.1.4.4.2 Bewertung des FEP

Die Kanalisierung in Dichtelementen wird durch mehrere FEP beeinflusst, die für die Ausprägung des potenziellen Alternativszenariums relevant sind. Von den beeinflussten FEP ist nur das vorzeitige Versagen der Verschlüsse relevant; diese FEP werden bei der Ableitung der Alternativszenarien „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt (Kapitel 6.1.4.6). Da alle Auswirkungen der Kanalisierung in Dichtelementen von diesen Alternativszenarien repräsentiert werden, wird hier kein weiteres Alternativszenarium betrachtet.

#### **6.1.4.5 Radionuklidmobilisierung und -transport für wahrscheinliche Ausprägungen der weniger wahrscheinlichen FEP**

Zur Festlegung des Referenzszenariums werden neben den FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren zusätzlich die FEP *Radionuklidmobilisierung* und *Radionuklidtransport* sowie ihre auslösenden und beeinflussenden FEP betrachtet. Im Folgenden wird dargestellt, welche Auswirkungen die Berücksichtigung jeweils eines weniger wahrscheinlichen FEP auf die o. g. FEP haben und ob sich daraus alternative Entwicklungsmöglichkeiten ableiten lassen. Unter Radionuklidtransport ist hier sowohl derjenige auf dem Gaspfad als auch derjenige auf dem Lösungspfad zu verstehen.

Erkundungsbohrungen werden nur außerhalb von Einlagerungsgrubenbauen gesteuert, so dass potenzielle Wegsamkeiten in ihnen die Radionuklidmobilisierung nicht direkt beeinflussen können. Sie können aber eine Wegsamkeit in Bereichen des Salzgesteins innerhalb des Sicherheitsabstands zu potenziell lösungsführenden Schichten darstellen, so dass sie den Lösungsstrom im Grubengebäude und damit die Radionuklidströme geringfügig beeinflussen können.

Die FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses*, *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* und *Kanalisation in Dichtelementen* beeinflussen nur Prozesse außerhalb der Einlagerungsstrecken und können daher die Radionuklidmobilisierung nicht direkt beeinflussen. Sie beeinflussen jedoch den Zutritt von Lösungen in den Infrastrukturbereich sowie in die Einlagerungsbereiche und -felder, das heißt, die Lösungsbewegung im Grubengebäude kann von ihnen insgesamt beeinflusst werden. Durch den möglichen Zutritt von Lösungen in die Einlagerungsfelder können indirekt die Radionuklidmobilisierung, die Radionuklidrückhaltung, die Korrosionsprozesse und der Transport der gelösten und gasförmigen Radionuklide beeinflusst werden. Der Transport von gasförmigen (volatilen) Radionukliden wird unter dem Einfluss eines der o. g. FEP direkt, das heißt ohne die Wechselwirkung mit einer zutretenden Lösung, beeinflusst, da diese Radionuklide sich in defekten Verschlüssen oder in Kanälen leichter ausbreiten können.

Die Auswirkungen des geänderten Radionuklidtransports werden im Rahmen der im folgenden beschriebenen Alternativszenarien mit behandelt; es sind daher keine speziellen Alternativszenarien zu betrachten, die mit der Radionuklidmobilisierung und dem Radionuklidtransport zusammenhängen.

#### **6.1.4.6 Beschreibung der Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP**

Alle Alternativszenarien für die Einlagerungsvariante AB1 basieren auf dem Referenzszenarium R1 (Kapitel 5.2). Die im Folgenden beschriebenen Abläufe beziehen sich daher auf den Vergleich bzw. auf Abweichungen zu diesem Referenzszenarium.

##### **6.1.4.6.1 Wegsamkeit in Erkundungsbohrung auf der Einlagerungssohle**

Das Alternativszenarium zu den Auswirkungen von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen basiert auf der Annahme einer Vorbohrung von einer Richtstrecke auf der Einlagerungssohle. Dabei wird nur der Fall betrachtet, dass die Integrität des Salzgesteins innerhalb des Sicherheitsabstands zwischen dem Grubengebäude und den angrenzenden potenziell wasserführenden Schichten verletzt wird. Wie in Kapitel 6.1.4.1 erläutert, wird dieser Fall durch das Alternativszenarium A1a3 abgedeckt, so dass hier kein eigenständiges Alternativszenarium definiert wird.

Weitere Alternativszenarien sind nicht zu betrachten, wie in Kapitel 6.1.4.1 erläutert ist.

##### **6.1.4.6.2 Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses**

###### **Alternativszenarium A1w1**

Das vorzeitige Versagen (aller Dichtelemente) eines Schachtverschlusses kann mit Hilfe eines Alternativszenariums abgebildet werden, bei dem einer der beiden Schachtverschlüsse mit einer erhöhten Permeabilität angenommen wird. Dieses Szenarium kann durch mehrere Prozesse, u. a. eine Kanalisierung in den Dichtelementen (Kapitel 6.1.4.4), eine Verletzung der spezifischen Annahmen (Kapitel 6.1.1.2) oder eine weniger wahrscheinliche Ausprägung eines wahrscheinlichen FEP (Kapitel 6.1.2), ausgelöst werden. Es ist damit auch repräsentativ für die Alternativszenarien, die aus diesen Prozessen abgeleitet werden.

Je nach Ereignisablauf wird der Schachtverschluss zu einem sehr frühen Zeitpunkt, das heißt unmittelbar zum Beginn der Nachverschlussphase, versagen oder zu einem späteren Zeitpunkt. Dabei ist dann jeweils von einer signifikant höheren integralen Permeabilität des Schachtverschlusses auszugehen. Es sind zwei Zeitpunkte des Ver-

sagens zu untersuchen: ein früher zu Beginn der Nachverschlussphase und ein später vor dem Ende der Funktionsdauer. Dadurch können unterschiedliche Auswirkungen, beispielsweise im Zusammenwirken mit den Fluiddrücken im Grubengebäude, untersucht werden.

#### **6.1.4.6.3 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses**

##### **Alternativszenarium A1w2**

Das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses kann mit Hilfe eines Alternativszenariums abgebildet werden, bei dem einer der Streckenverschlüsse zu einem frühen Zeitpunkt, das heißt unmittelbar zum Beginn der Nachverschlussphase, mit einer erhöhten Permeabilität angenommen wird. Dieses Szenarium kann durch mehrere Prozesse, u. a. eine Kanalisierung in den Dichtelementen (Kapitel 6.1.4.4), eine Verletzung der spezifischen Annahmen (Kapitel 6.1.1.2) oder eine weniger wahrscheinliche Ausprägung eines wahrscheinlichen FEP (Kapitel 6.1.2), ausgelöst werden.

Es sind drei Varianten des Alternativszenariums zu betrachten, da die Streckenverschlüsse als Abgrenzung zum Ostflügel, als Abgrenzung zum Westflügel oder als Abgrenzung der beiden Flügel voneinander dienen und ein Versagen des jeweiligen Streckenverschlusses zu unterschiedlichen Konsequenzen führen kann. Dabei wird jeweils ein frühes Versagen des Streckenverschlusses zu Beginn der Nachverschlussphase als relevante Variante unterstellt. Ein anderer Zeitpunkt des Eintretens kann ggf. untersucht werden, falls sich aus den Ergebnissen der Analysen Hinweise auf eine Zeitabhängigkeit ergeben.

#### **6.1.4.7 Zusammenfassende Darstellung**

Die Betrachtung aller weniger wahrscheinlichen FEP mit einer direkten Beeinträchtigung einer Initial-Barriere führt zu insgesamt zwei Alternativszenarien, die im Rahmen von Konsequenzenanalysen zu betrachten sind (Tab. 6.25). Sie basieren auf den FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses*. Die Auswirkungen des FEP *Kanalisierung in Dichtelementen* werden durch diese beiden Alternativszenarien repräsentiert. Die Auswirkungen des FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* werden durch das Alternativszenarium A1a3 repräsentiert (Kapitel 6.1.1.3).

**Tab. 6.25** Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP für die Einlagerungsvariante AB1

FEP-Nr.	Alternativszenarium	Beeinträchtigte Initial-Barriere**	Erläuterungen	Bezug
2.1.07.05	A1w1: Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	SchV	Frühzeitig* erhöhte Durchlässigkeit eines Schachtverschlusses Varianten: Versagen zu Beginn der Nachverschlussphase; Versagen später	Kapitel 6.1.4.2
2.1.07.06	A1w2: Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	StrV	Frühzeitig* erhöhte Durchlässigkeit eines Streckenverschlusses Varianten: StrV im Ostflügel; StrV im Westflügel; StrV in der Verbindung der beiden Flügel	Kapitel 6.1.4.3

\* Frühzeitig bedeutet: früh im Verhältnis zur vorgesehenen Funktionsdauer des Verschlusses

\*\* SchV „Schachtverschluss“; StrV „Streckenverschluss“

## 6.2 Alternativszenarien zur Einlagerungsvariante AB2

Für die Ableitung von Alternativszenarien in Bezug auf die Einlagerungsvariante AB2 gilt die gleiche Vorgehensweise, die in der Darstellung der Methodik zur Szenarientwicklung aufgezeigt (Kapitel 3.3.2) und hinsichtlich der Einlagerungsvariante AB1 angewandt wurde (Kapitel 6.1). Da für die Einlagerungsvariante AB2 die gleichen spezifischen Annahmen, Initial-FEP und weniger wahrscheinlichen FEP wie für die Einlagerungsvariante AB1 heranzuziehen sind, werden im Folgenden nicht mehr die gesamten Entwicklungsschritte für die insgesamt vier Ausgangspunkte zur Ableitung von Alternativszenarien beschrieben. Es wird vielmehr auf die möglichen Unterschiede oder Gemeinsamkeiten hinsichtlich Einflussnahme und Ausprägung von FEP und die Übertragbarkeit von bestehenden Alternativszenarien eingegangen. Darüber hinaus wird hinterfragt, ob zusätzlich zu den für die Einlagerungsvariante AB1 genannten noch weitere Alternativszenarien abzuleiten sind.

Die o. g. Feststellung, hinsichtlich gleicher spezifischer Annahmen, Initial-FEP und weniger wahrscheinlicher FEP muss sich nicht zwingend für alle möglichen Einlagerungsvarianten ergeben. So kann es durchaus sein, dass je nach Einlagerungsvariante gesonderte spezifische Annahmen zu treffen oder auch weitere einlagerungsspezifische Initial-FEP sowie weniger wahrscheinliche FEP zu berücksichtigen sind.

## **6.2.1 Alternative Betrachtung zu spezifischen Annahmen**

Die als Randbedingung festgelegten spezifischen Annahmen gelten für alle in dem Vorhaben VSG abzuleitenden Referenzszenarien (vgl. Kapitel 5.1.2). Das bedeutet, dass diese Annahmen auch für die Alternativszenarien in der Einlagerungsvariante AB2 aus der alternativen Betrachtung zu spezifischen Annahmen heranzuziehen sind.

Eingangs zu Kapitel 6.2 wurde bereits darauf eingegangen, dass die Entwicklungsschritte zur Ableitung der Alternativszenarien nicht mehr im Detail dargestellt, sondern mögliche Unterschiede oder auch Gemeinsamkeiten identifiziert werden. Auf dieser Grundlage werden dann bestehende Alternativszenarien aus der Einlagerungsvariante AB1 übernommen, modifiziert oder auch verworfen. Darüber hinaus wird untersucht, ob zusätzlich zu den bestehenden noch weitere Alternativszenarien abzuleiten sind.

Im Folgenden werden die spezifischen Annahmen bzw. deren alternative Betrachtung unter Einbeziehung der bereits vorgenommenen Untersuchungsschritte zur Einlagerungsvariante AB1 (Kapitel 6.1) nach den vorgestellten Aspekten diskutiert.

### **6.2.1.1 Spezifische Annahme zur Klimaentwicklung**

#### **Spezifische Annahme**

„Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps Elster ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen, die dem Verlauf der bereits auf dem Standort vorliegenden Gorlebener Rinne folgt.“

Die o. g. spezifische Annahme ist unabhängig von der Einlagerungsvariante zu sehen. Die aus der alternativen Betrachtung zur spezifischen Annahme resultierenden Alternativszenarien (Kapitel 6.1.1.1) gelten daher auch für die Einlagerungsvariante AB2. Darüber hinaus lassen sich aus der alternativen Betrachtung der spezifischen Annahme keine weiteren zusätzlichen Alternativszenarien ableiten.

Daraus folgt, dass für die Einlagerungsvariante AB2 die gleichen Alternativszenarien aus der alternativen Betrachtung der spezifischen Annahme zur Klimaentwicklung wie für die Einlagerungsvariante AB1 heranzuziehen sind.

Die Alternativszenarien sind demnach:

- Alternativszenarium A2a1, das dem Alternativszenarium A1a1 entspricht (Kapitel 6.1.1.1) und
- Alternativszenarium A2a2, das dem Alternativszenarium A1a2 entspricht (Kapitel 6.1.1.1).

### **6.2.1.2 Spezifische Annahme zu Schacht- und Streckenverschlüssen**

#### **Spezifische Annahme**

„Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.“

Die Schacht- und Streckenverschlüsse aus der Einlagerungsvariante AB1 bleiben für die Einlagerungsvariante AB2 unverändert. Das heißt, die Position, Anzahl, Ausführung und Anforderungen bleiben für die Schacht- und Streckenverschlüsse gleich. Damit gelten für die alternative Betrachtung von der spezifischen Annahme die gleichen Ausführungen wie zur Einlagerungsvariante AB1. Daraus folgt, dass die möglichen Alternativszenarien analog zu Kapitel 6.1.1.2 in repräsentativer Form in den Alternativszenarien A2w1 und A2w2 mit Bezug zu den weniger wahrscheinlichen FEP

- *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und
- *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses*

behandelt werden (Kapitel 6.2.4.2 und 6.2.4.3).

Es sind daher keine zusätzlichen Alternativszenarien aufzustellen.

### 6.2.1.3 Spezifische Annahme zum Sicherheitsabstand

#### Spezifische Annahme

„Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) von den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.“

Es gelten die gleichen Aussagen hinsichtlich der Möglichkeit für fehlinterpretierte Erkundungsergebnisse oder unerkannte geologische Merkmale wie für die Einlagerungsvariante AB1. Auch für die Einlagerungsvariante AB2 ist ein Sicherheitsabstand von 50 m einzuhalten. Die Alternativszenarien aus Kapitel 6.1.1.3 lassen sich daher auf die Einlagerungsvariante AB2 übertragen. Es ist noch darauf hinzuweisen, dass die Temperaturentwicklung für die Einlagerungsvariante AB2 im Vergleich zur Einlagerungsvariante AB1 aufgrund der veränderten Beladung und Anordnung der Behälter mit den wärmeentwickelnden Abfällen geringfügig unterschiedlich sein wird. Hieraus ergeben sich andere temperaturbedingte Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen, die sich wiederum unterschiedlich auf die umgebenden Gesteinsschichten auswirken. Allerdings werden diesen Effekten aufgrund der erwarteten geringfügigen Unterschiede in der Temperaturentwicklung gegenüber der Einlagerungsvariante AB1 keine große Bedeutung beigemessen.

Die Alternativszenarien sind demnach:

- Alternativszenarium A2a3, das dem Alternativszenarium A1a3 entspricht (Kapitel 6.1.1.3) und
- Alternativszenarium A2a4, das dem Alternativszenarium A1a4 entspricht (Kapitel 6.1.1.3).

#### **6.2.1.4 Spezifische Annahme zur Erkundungssohle**

##### **Spezifische Annahme**

„Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.“

Für die Einlagerungsvariante AB2 ergeben sich im Vergleich zu den Ausführungen zur Einlagerungsvariante AB1 keine bedeutenden Unterschiede. Es ist daher das gleiche Alternativszenarium wie bei der Einlagerungsvariante AB1 zugrunde zu legen.

Es ergibt sich demnach das Alternativszenarium A2a5, das dem Alternativszenarium A1a5 entspricht (Kapitel 6.1.1.4).

#### **6.2.2 Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP**

Bezüglich der möglichen Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP sowie der FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport für die Einlagerungsvariante AB2 wird eine Differenzbetrachtung gegenüber der Einlagerungsvariante AB1 durchgeführt. Dabei wird untersucht, ob sich durch die unterschiedliche Einlagerungsvariante auch eine unterschiedliche weniger wahrscheinliche Ausprägung des jeweiligen FEP ergibt. Im Folgenden wird für jedes Initial-FEP und die FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport kurz beschrieben, inwieweit sich die Einlagerungsvariante auf die weniger wahrscheinliche Ausprägung auswirkt und ob ein Alternativszenarium zu betrachten ist. Das Alternativszenarium bezieht sich dann jeweils auf das Referenzszenarium R2 der hier betrachteten Einlagerungsvariante.

##### **6.2.2.1 Erdbeben**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.1 zu diesem FEP gelten auch hier. Für die Zwecke der Szenarienentwicklung wird eine repräsentative Ausprägung im Referenzszenarium R2 berücksichtigt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

#### **6.2.2.2 Diapirismus**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.2 zu diesem FEP gelten auch hier. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Diapirismus* wird vom Referenzszenarium R2 abgedeckt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

#### **6.2.2.3 Subrosion**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.3 zu diesem FEP gelten prinzipiell auch hier. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A2i9 zu betrachten.

#### **6.2.2.4 Bildung kryogener Klüfte**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.4 zu diesem FEP gelten auch hier. Für die Zwecke der Szenarienentwicklung wird eine repräsentative Ausprägung im Referenzszenarium R2 berücksichtigt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

#### **6.2.2.5 Glaziale Rinnenbildung**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.5 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A2i1 zu betrachten, das dem Alternativszenarium A1i1 entspricht.

#### **6.2.2.6 Versagen eines Brennelement-Behälters**

Das FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da in den verschiedenen Varianten die Einlagerung unterschiedlicher Behältertypen und eine unterschiedliche Anzahl von Behältern betrachtet werden. Die

Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 bezüglich der Berechnung der Anzahl von Behälter mit Fertigungsfehler gelten auch hier. Dementsprechend errechnet sich die Anzahl der in das Endlager eingelagerten Behälter mit Fertigungsfehler für die Einlagerungsvariante AB2 zu vier Castoren für Leistungsreaktor-Brennelemente und drei Castoren für Forschungsreaktor-Brennelemente. Die Position der Behälter mit Fertigungsfehler im Endlager ist unbekannt.

Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP wie in der Variante B1 (Kapitel 6.1.2.6). Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A2i2 zu betrachten.

#### **6.2.2.7 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.7 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A2w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A2w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

#### **6.2.2.8 Konvergenz**

Das FEP *Konvergenz* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da den unterschiedlichen Varianten unterschiedliche Streckenquerschnitte und Hohlraumvolumina zugrunde liegen. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Konvergenz wird wie in der Einlagerungsvariante AB1 angenommen. Obwohl die weniger wahrscheinliche Ausprägung identisch mit jener bei der Einlagerungsvariante AB1 gewählt wurde, kann sich die tatsächliche Ausprägung der Konvergenz aufgrund des anderen zugrunde liegenden Grubengebäudes sowie anderer Spannungs- und Temperaturver-

hältnisse unterscheiden. Die Abweichungen vom Referenzszenarium R2 sind in einem Alternativszenarium A2i3 zu betrachten.

#### **6.2.2.9 Fluiddruck**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.9 zu diesem FEP gelten auch hier. Für das FEP *Fluiddruck* wird weder eine wahrscheinliche, noch eine weniger wahrscheinliche Ausprägung festgelegt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

#### **6.2.2.10 Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.10 zu diesem FEP gelten auch hier. Für das FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien* ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung zu betrachten. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

#### **6.2.2.11 Lageverschiebung des Schachtverschlusses**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.11 zu diesem FEP gelten auch hier. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* hängt nicht von der Einlagerungsvariante ab. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A2w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ berücksichtigt, das aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barriere abgeleitet wird.

#### **6.2.2.12 Quellen des Bentonits**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.12 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Quellen des Bentonits* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alter-

nativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A2w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ berücksichtigt, das aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barriere abgeleitet wird.

#### **6.2.2.13 Auflösung und Ausfällung**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.13 zu diesem FEP gelten auch hier. Für das FEP *Auflösung und Ausfällung* wird weder eine wahrscheinliche, noch eine weniger wahrscheinliche Ausprägung festgelegt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

#### **6.2.2.14 Metallkorrosion**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.14 zu diesem FEP gelten auch hier. Für die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Metallkorrosion* gilt, dass die Korrosion schneller voranschreitet als für das Referenzszenarium R2 angenommen. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A2i4 zu betrachten.

#### **6.2.2.15 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.15 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Korrosion von Materialien mit Zement oder Sorelphasen* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A2w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A2w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

#### **6.2.2.16 Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.16 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die jedoch nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A2i2 und A2i4 berücksichtigt, die aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* und *Metallkorrosion* abgeleitet werden.

#### **6.2.2.17 Auflockerungszone**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.17 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Auflockerungszone* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A2w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A2w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

#### **6.2.2.18 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.18 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die jedoch nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A2i6, das aus der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* abgeleitet wird, sowie die Alternativszenarien A2w1 „Vorzeitiges Versagen eines

Schachtverschlusses“ und A2w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

#### **6.2.2.19 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung**

Das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da in den unterschiedlichen Varianten eine unterschiedliche räumliche Verteilung der eingelagerten Abfälle vorgesehen ist und somit je nach Einlagerungsvariante u. a. ein unterschiedliches anfängliches Spannungsfeld und ein unterschiedliches Temperaturfeld im Wirtsgestein vorliegen. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Spannungsänderung und Spannungsumlagerung wird wie in der Einlagerungsvariante AB1 angenommen (Kapitel 6.1.2.19) und ergibt sich durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des Wärmeeintrags in das Wirtsgestein.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A2i5 zu betrachten.

#### **6.2.2.20 Fluidvorkommen im Wirtsgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.20 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A2i6 zu betrachten, das dem Alternativszenarium A1i6 entspricht.

#### **6.2.2.21 Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.21 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die jedoch nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der

resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A2i7, das aus der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion* abgeleitet wird, berücksichtigt.

#### **6.2.2.22 Thermochemische Sulfatreduktion**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.22 zu diesem FEP gelten prinzipiell auch hier. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R2 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A2i7 zu betrachten.

#### **6.2.2.23 Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.23 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A2i8 zu betrachten.

### **6.2.3 Radionuklidmobilisierung und -transport**

Das FEP *Radionuklidmobilisierung* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da in den unterschiedlichen Einlagerungsvarianten sowohl eine andere Temperaturverteilung als auch ein anderer Stoffbestand im Nahfeld zugrunde liegen. Dadurch können sich weniger wahrscheinliche Ausprägungen der FEP *Lösungen im Grubenbau* und *Geochemisches Milieu* ergeben, die beide die Radionuklidmobilisierung beeinflussen. Dies ist z. B. bei der Auflösung der Glasmatrix von verglasten Abfällen der Fall. Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der beiden genannten FEP können zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit gegenüber dem Referenzszenarium R2 führen. Diese alternative Entwicklungsmöglichkeit ist in einem zusätzlichen Alternativszenarium A2m1 zu untersuchen.

Aus den FEP zum Radionuklidtransport ergeben sich keine zusätzlichen Alternativszenarien, da – wie bereits im Zusammenhang mit der Einlagerungsvariante AB1 erläutert

– keine weiteren Beeinflussungen betrachtet werden müssen, die nicht bereits durch die Radionuklidmobilisierung abgedeckt sind.

#### **6.2.4 Weniger wahrscheinliche FEP**

Wie bei den Alternativszenarien für die Einlagerungsvariante AB1, vgl. Kapitel 3.3.2.4 und 6.1.4, werden vier weniger wahrscheinliche FEP, die eine direkte Beeinträchtigung einer Initial-Barriere aufweisen, für die Ableitung der Alternativszenarien in der Einlagerungsvariante AB2 betrachtet:

- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen,
- Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses,
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses,
- Kanalisierung in Dichtelementen.

Über diese FEP hinaus gibt es keine weiteren konzeptspezifischen, weniger wahrscheinlichen FEP.

##### **6.2.4.1 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.1 zu diesem FEP gelten auch hier. Durch die horizontalen Bohrlöcher in dieser Variante ändert sich an diesen Aussagen nichts, so dass die zu betrachtenden Alternativszenarien denjenigen der Einlagerungsvariante AB1 entsprechen (Tab. 6.25).

##### **6.2.4.2 Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.2 zu diesem FEP gelten auch hier. Die zu betrachtenden Alternativszenarien entsprechen denjenigen der Einlagerungsvariante AB1 (Tab. 6.25).

#### **6.2.4.3 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.3 zu diesem FEP gelten auch hier. Die zu betrachtenden Alternativszenarien entsprechen denjenigen der Einlagerungsvariante AB1 (Tab. 6.25).

#### **6.2.4.4 Kanalisierung in Dichtelementen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.4 zu diesem FEP gelten auch hier. Die Auswirkungen der Kanalisierung in Dichtelementen werden durch die FEP *Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* abgedeckt, so dass keine weiteren Alternativszenarien zu betrachten sind.

#### **6.2.4.5 Zusammenfassung**

Die Betrachtung aller weniger wahrscheinlichen FEP des FEP-Katalogs führt zu zwei Alternativszenarien, die im Rahmen von Konsequenzenanalysen zu betrachten sind (Tab. 6.26). Sie basieren auf den FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses*. Die Auswirkungen des FEP *Kanalisierung in Dichtelementen* werden durch diese beiden Alternativszenarien abgedeckt. Die Auswirkungen des FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* werden durch das Alternativszenarium A2a3 abgedeckt (Kapitel 6.2.1.3).

**Tab. 6.26** Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP für die Einlagerungsvariante AB2

FEP-Nr.	Alternativszenarium	Beeinträchtigte Initial-Barriere **	Erläuterungen	Bezug
2.1.07.05	A2w1 (entspricht A1w1): Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	SchV	Frühzeitig* erhöhte Durchlässigkeit eines Schachtverschlusses Varianten: Versagen zu Beginn der Nachverschlussphase; Versagen später	Kapitel 6.2.4.2
2.1.07.06	A2w2 (entspricht A1w2): Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	StrV	Frühzeitig* erhöhte Durchlässigkeit eines Streckenverschlusses Varianten: StrV im Ostflügel; StrV im Westflügel; StrV in der Verbindung der beiden Flügel	Kapitel 6.2.4.3

\* Frühzeitig bedeutet: früh im Verhältnis zur vorgesehenen Funktionszeit des Verschlusses

\*\* SchV „Schachtverschluss“; StrV „Streckenverschluss“

### 6.3 Alternativszenarien zur Einlagerungsvariante AC

Für die Ableitung von Alternativszenarien in Bezug auf die Einlagerungsvariante AC gilt die gleiche Vorgehensweise, die in der Darstellung der Methodik zur Szenarientwicklung aufgezeigt (Kapitel 3.3.2) und hinsichtlich der Einlagerungsvariante AB1 angewandt wurde (Kapitel 6.1). Da für die Einlagerungsvariante AC die gleichen spezifischen Annahmen, Initial-FEP und weniger wahrscheinlichen FEP wie für die Einlagerungsvariante AB1 heranzuziehen sind, werden im Folgenden nicht mehr die gesamten Entwicklungsschritte für die insgesamt vier Ausgangspunkte zur Ableitung von Alternativszenarien beschrieben. Es wird vielmehr auf die möglichen Unterschiede oder Gemeinsamkeiten hinsichtlich Einflussnahme und Ausprägung von FEP und die Übertragbarkeit von bestehenden Alternativszenarien eingegangen. Darüber hinaus wird hinterfragt, ob zu den bestehenden noch weitere Alternativszenarien abzuleiten sind.

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass sich die o. g. Feststellung hinsichtlich gleicher spezifischer Annahmen, Initial-FEP und weniger wahrscheinliche FEP nicht zwingend

für alle möglichen Einlagerungsvarianten so ergeben muss. So kann es durchaus sein, dass je nach Einlagerungsvariante gesonderte spezifische Annahmen zu treffen oder auch weitere einlagerungsspezifische Initial-FEP sowie weniger wahrscheinliche FEP zu berücksichtigen sind.

### **6.3.1 Alternative Betrachtung zu spezifischen Annahmen**

Die als Randbedingung festgelegten spezifischen Annahmen gelten für alle in dem Vorhaben VSG abzuleitenden Referenzszenarien (vgl. Kapitel 5.1.2). Das bedeutet, dass diese Annahmen auch für die Alternativszenarien aus der alternativen Betrachtung zu spezifischen Annahmen heranzuziehen sind.

Eingangs zu Kapitel 6.3 wurde bereits darauf eingegangen, dass die Entwicklungsschritte zur Ableitung der Alternativszenarien nicht mehr im Detail dargestellt, sondern mögliche Unterschiede oder auch Gemeinsamkeiten identifiziert werden. Auf dieser Grundlage werden dann bestehende Alternativszenarien übernommen, modifiziert oder auch verworfen. Darüber hinaus ist zu untersuchen, ob zusätzlich zu den bestehenden noch weitere Alternativszenarien abzuleiten sind.

Im Folgenden werden die spezifischen Annahmen bzw. deren alternative Betrachtung unter Einbeziehung der bereits vorgenommenen Untersuchungsschritte zur Einlagerungsvariante AB1 (Kapitel 6.1) nach den vorgestellten Aspekten diskutiert.

#### **6.3.1.1 Spezifische Annahme zur Klimaentwicklung**

##### **Spezifische Annahme**

„Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps Elster ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen, die dem Verlauf der bereits auf dem Standort vorliegenden Gorlebener Rinne folgt.“

Die o. g. spezifische Annahme ist unabhängig von der Einlagerungsvariante zu sehen. Die aus der alternativen Betrachtung zur spezifischen Annahme resultierenden Alterna-

tivsszenarien (Kapitel 6.1.1.1) gelten daher auch für die Einlagerungsvariante AC. Darüber hinaus lassen sich aus der alternativen Betrachtung der spezifischen Annahme keine weiteren zusätzlichen Alternativsszenarien ableiten.

Daraus folgt, dass für die Einlagerungsvariante AC die gleichen Alternativsszenarien aus der alternativen Betrachtung der spezifischen Annahme zur Klimaentwicklung wie für die Einlagerungsvariante AB1 heranzuziehen sind.

Die Alternativsszenarien sind demnach:

- Alternativsszenarium A3a1, das dem Alternativsszenarium A1a1 entspricht (Kapitel 6.1.1.1) und
- Alternativsszenarium A3a2, das dem Alternativsszenarium A1a2 entspricht (Kapitel 6.1.1.1).

### **6.3.1.2 Spezifische Annahme zu Schacht- und Streckenverschlüssen**

#### **Spezifische Annahme**

„Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.“

Die Schacht- und Streckenverschlüsse aus der Einlagerungsvariante AB1 bleiben für die Einlagerungsvariante AC hinsichtlich Position, Anzahl, Ausführung und Anforderungen unverändert. Damit gelten für die alternative Betrachtung von der spezifischen Annahme die gleichen Ausführungen wie zur Einlagerungsvariante AB1. Daraus folgt, dass die möglichen Alternativsszenarien analog zu Kapitel 6.1.1.2 in repräsentativer Form in den Alternativsszenarien A3w1 und A3w2 mit Bezug zu den weniger wahrscheinlichen FEP

- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses und
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

behandelt werden (Kapitel 6.3.4.2 und 6.3.4.3).

Es sind daher keine zusätzlichen Alternativsszenarien aufzustellen.

### 6.3.1.3 Spezifische Annahme zum Sicherheitsabstand

#### Spezifische Annahme

„Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) von den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.“

Im Prinzip gelten die gleichen Aussagen wie für die Einlagerungsvariante AB1. Auch für die Einlagerungsvariante AC ist ein Sicherheitsabstand von 50 m einzuhalten. Ein Unterschied besteht darin, dass bei der Einlagerungsvariante AC durch die 300 m tiefen Bohrlöcher ein Bereich aufgefahren wird, der von dem söhligem Erkundungsbereich weiter entfernt ist als bei der Einlagerungsvariante AB1. Trotzdem gelten die gleichen Aussagen hinsichtlich der Möglichkeit für fehlinterpretierte Erkundungsergebnisse oder unerkannte geologische Merkmale wie unter der Einlagerungsvariante AB1. Die Alternativszenarien aus Kapitel 6.1.1.3 lassen sich daher auf die Einlagerungsvariante AC übertragen. Es ist noch darauf hinzuweisen, dass die Temperaturentwicklung für die Einlagerungsvariante AC im Vergleich zur Einlagerungsvariante AB1 unterschiedlich sein wird. Hieraus ergeben sich andere temperaturbedingte Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen, die sich wiederum unterschiedlich auf die umgebenden Gesteinsschichten auswirken. Auch die thermochemische Sulfatreduktion (TSR) wirkt aufgrund der gegenüber der Variante B1 veränderten Temperaturverteilung in anderen Bereichen des Wirtsgesteins.

Die Alternativszenarien sind demnach:

- Alternativszenarium A3a3, das dem Alternativszenarium A1a3 entspricht (Kapitel 6.1.1.3) und
- Alternativszenarium A3a4, das dem Alternativszenarium A1a4 entspricht (Kapitel 6.1.1.3).

#### **6.3.1.4 Spezifische Annahme zur Erkundungssohle**

##### **Spezifische Annahme**

„Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.“

Für die Variante A ergeben sich im Vergleich zu den Ausführungen zur Einlagerungsvariante AB1 keine Unterschiede. In Bezug auf die Variante C ist gegenüber der Variante B1 eine andere Temperaturentwicklung zu verzeichnen, die möglicherweise eine andere Spannungssituation auf die Erkundungssohle bewirken. Es ist das gleiche Alternativszenarium wie bei der Einlagerungsvariante AB1 zugrunde zu legen. Hierbei sind die entsprechenden Ausprägungen, die sich unter Zugrundelegung der Einlagerungsvariante AC ergeben, zu berücksichtigen.

Es ergibt sich demnach das Alternativszenarium A3a5, das dem Alternativszenarium A1a5 entspricht (Kapitel 6.1.1.4).

#### **6.3.2 Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP**

Bezüglich der möglichen Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP sowie der FEP zu Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport für die Einlagerungsvariante AC wird eine Differenzbetrachtung gegenüber der Einlagerungsvariante AB1 durchgeführt. Dabei wird untersucht, ob sich durch die unterschiedliche Einlagerungsvariante auch eine unterschiedliche weniger wahrscheinliche Ausprägung des jeweiligen FEP ergibt. Im Folgenden wird für jedes Initial-FEP und die FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport kurz beschrieben, inwieweit sich die Einlagerungsvariante auf die weniger wahrscheinliche Ausprägung auswirkt und ob ein Alternativszenarium zu betrachten ist. Das Alternativszenarium bezieht sich dann jeweils auf das Referenzszenarium R3 der hier betrachteten Einlagerungsvariante.

### **6.3.2.1 Erdbeben**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.1 zu diesem FEP gelten auch hier. Für die Zwecke der Szenarientwicklung wird eine repräsentative Ausprägung im Referenzszenarium R3 berücksichtigt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.3.2.2 Diapirismus**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.2 zu diesem FEP gelten auch hier. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Diapirismus* wird vom Referenzszenarium R3 abgedeckt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.3.2.3 Subrosion**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.3 zu diesem FEP gelten prinzipiell auch hier. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R3 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A3i9 zu betrachten.

### **6.3.2.4 Bildung kryogener Klüfte**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.4 zu diesem FEP gelten auch hier. Für die Zwecke der Szenarientwicklung wird eine repräsentative Ausprägung im Referenzszenarium R3 berücksichtigt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.3.2.5 Glaziale Rinnenbildung**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.5 zu diesem FEP gelten auch hier. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung* ist unabhängig von der Einlagerungsvariante. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen

Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A3i1 zu betrachten, das dem Alternativszenarium A1i1 entspricht.

#### **6.3.2.6 Versagen eines Brennelement-Behälters**

Das FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da in den verschiedenen Varianten die Einlagerung unterschiedlicher Behältertypen und eine unterschiedliche Anzahl von Behältern betrachtet werden. Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 bezüglich der Berechnung der Anzahl von Behältern mit Fertigungsfehlern gelten auch hier. Dementsprechend errechnet sich die Anzahl der in das Endlager eingelagerten Behälter mit Fertigungsfehlern für die Einlagerungsvariante AC zu 14 BSK für Leistungsreaktor-Brennelemente und zwei BSK für Forschungsreaktor-Brennelemente. Die Position der Behälter mit Fertigungsfehler im Endlager ist unbekannt.

Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* ergibt sich durch eine veränderte Ausprägung seiner resultierenden und beeinflussten FEP wie in der Variante B1 (Kapitel 6.1.2.6). Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A3i2 zu betrachten.

#### **6.3.2.7 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.7 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A3w1 und A3w2 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

### **6.3.2.8 Konvergenz**

Das FEP *Konvergenz* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da den unterschiedlichen Varianten unterschiedliche Streckenquerschnitte und Hohlraumvolumina sowie andere Spannungs- und Temperaturverhältnisse zugrunde liegen. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Konvergenz wird wie in der Einlagerungsvariante AB1 angenommen. Trotz der gleichen Annahme, kann sich die tatsächliche Ausprägung der Konvergenz aufgrund des anderen zugrunde liegenden Grubengebäudes und der Spannungs- und Temperaturverhältnisse unterscheiden. Die Abweichungen vom Referenzszenarium R3 sind in einem Alternativszenarium A3i3 zu betrachten.

### **6.3.2.9 Fluiddruck**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.9 zu diesem FEP gelten auch hier. Für das FEP *Fluiddruck* wird weder eine wahrscheinliche, noch eine weniger wahrscheinliche Ausprägung festgelegt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.3.2.10 Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.10 zu diesem FEP gelten auch hier. Für das FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien* ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung zu betrachten. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

### **6.3.2.11 Lageverschiebung des Schachtverschlusses**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.11 zu diesem FEP gelten auch hier. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* ist unabhängig von der Einlagerungsvariante. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R3 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A3w1

„Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ berücksichtigt, das aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barriere abgeleitet wird.

#### **6.3.2.12 Quellen des Bentonits**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.12 zu diesem FEP gelten auch hier. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Quellen des Bentonits* ist unabhängig von der Einlagerungsvariante. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R3 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A3w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ berücksichtigt, das aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barriere abgeleitet wird.

#### **6.3.2.13 Auflösung und Ausfällung**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.13 zu diesem FEP gelten auch hier. Für das FEP *Auflösung und Ausfällung* wird weder eine wahrscheinliche, noch eine weniger wahrscheinliche Ausprägung festgelegt. Ein alternatives Szenarium ist nicht zu betrachten.

#### **6.3.2.14 Metallkorrosion**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.14 zu diesem FEP gelten auch hier. Für die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Metallkorrosion* gilt, dass die Korrosion schneller voranschreitet als für das Referenzszenarium R3 angenommen. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A3i4 zu betrachten.

#### **6.3.2.15 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.15 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Korrosion von*

*Materialien mit Zement oder Sorelphasen* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R3 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A3w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A3w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

#### **6.3.2.16 Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.16 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die jedoch nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A3i2 und A3i4 berücksichtigt, die aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters* und *Metallkorrosion* abgeleitet werden.

#### **6.3.2.17 Auflockerungszone**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.17 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Auflockerungszone* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R3 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch die repräsentativen Alternativszenarien A3w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A3w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

### **6.3.2.18 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.18 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die jedoch nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A3i6, das aus der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* abgeleitet wird, sowie die Alternativszenarien A3w1 „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ und A3w2 „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ berücksichtigt, die aus weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren abgeleitet werden.

### **6.3.2.19 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung**

Das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da in den unterschiedlichen Varianten eine unterschiedliche räumliche Verteilung der eingelagerten Abfälle vorgesehen ist und somit je nach Einlagerungsvariante u. a. ein unterschiedliches anfängliches Spannungsfeld und ein unterschiedliches Temperaturfeld im Wirtsgestein vorliegen. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Spannungsänderung und Spannungsumlagerung wird wie in der Einlagerungsvariante AB1 angenommen (Kapitel 6.1.2.19) und ergibt sich durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des Wärmeeintrags in das Wirtsgestein.

Die Abweichungen vom Referenzszenarium sind in einem Alternativszenarium A3i5 zu betrachten.

### **6.3.2.20 Fluidvorkommen im Wirtsgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.20 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer

alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A3i6 zu betrachten, das dem Alternativszenarium A1i6 entspricht.

#### **6.3.2.21 Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.21 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit, die jedoch nicht in einem zusätzlichen Alternativszenarium betrachtet wird. Stattdessen werden die Ausprägungen der resultierenden und beeinflussten FEP durch das repräsentative Alternativszenarium A3i7, das aus der weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Thermochemische Sulfatreduktion* abgeleitet wird, berücksichtigt.

#### **6.3.2.22 Thermochemische Sulfatreduktion**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.22 zu diesem FEP gelten auch hier. Eine Abweichung vom Referenzszenarium R3 durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A3i7 zu betrachten.

#### **6.3.2.23 Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.2.23 zu diesem FEP gelten auch hier, da die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* nicht von der Einlagerungsvariante abhängt. Eine Abweichung vom Referenzszenarium durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung führt zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit und ist in einem Alternativszenarium A3i8 zu betrachten.

### **6.3.3 Radionuklidmobilisierung und -transport**

Das FEP *Radionuklidmobilisierung* hängt von der betrachteten Einlagerungsvariante ab, da in den unterschiedlichen Einlagerungsvarianten sowohl eine andere Tempera-

turverteilung als auch ein anderer Stoffbestand im Nahfeld zugrunde liegen. Dadurch können sich andere weniger wahrscheinliche Ausprägungen der FEP *Lösungen im Grubenbau* und *Geochemisches Milieu* ergeben, die beide die Radionuklidmobilisierung beeinflussen. Dies ist z. B. bei der Auflösung der Glasmatrix von verglasten Abfällen der Fall. Die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der beiden genannten FEP können zu einer alternativen Entwicklungsmöglichkeit gegenüber dem Referenzszenarium R3 führen. Diese alternative Entwicklungsmöglichkeit ist in einem zusätzlichen Alternativszenarium A3m1 zu untersuchen.

Aus den FEP zum Radionuklidtransport ergeben sich keine zusätzlichen Alternativszenarien, da – wie bereits im Zusammenhang mit der Einlagerungsvariante AB1 erläutert – keine weiteren Beeinflussungen betrachtet werden müssen, die nicht bereits durch die Radionuklidmobilisierung abgedeckt sind.

### **6.3.4 Weniger wahrscheinliche FEP**

Wie bei den Alternativszenarien für die Einlagerungsvariante AB1, vgl. Kapitel 3.3.2.4 und 6.1.4, werden vier weniger wahrscheinliche FEP, die eine direkte Beeinträchtigung einer Initial-Barriere aufweisen, für die Ableitung der Alternativszenarien betrachtet:

- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen,
- Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses,
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses,
- Kanalisierung in Dichtelementen.

Über diese FEP hinaus gibt es keine weiteren konzeptspezifischen, weniger wahrscheinlichen FEP.

#### **6.3.4.1 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.1 zu diesem FEP gelten auch hier. Durch die vertikale Ausdehnung des Grubengebäudes aufgrund der Bohrlöcher in der Variante C sind jedoch weitere Erkundungsbohrungen in vertikaler Richtung zu berücksichtigen. Dabei wird angenommen, dass vor jeder Einlagerungsbohrung eine Vorbohrung gestoßen wird. Wird in dieser Vorbohrung bei der Erkundung

eine Unregelmäßigkeit festgestellt, die zu einer Nichteignung für die Einlagerung führt – z. B. bei einem technischen Problem, oder wenn größere Mengen Kohlenwasserstoffe angetroffen werden –, wird an dieser Stelle eine Einlagerung ausgeschlossen und die Vorbohrung dicht verschlossen. Nach einem technischen Problem ist eine Wegsamkeit in der verschlossenen Vorbohrung nicht relevant, da sie ohne Verbindung nach außen im homogenen Steinsalz verläuft und die Lösungsbewegung und Radionuklidenausbreitung nur unwesentlich beeinflusst. Bei den Kohlenwasserstoffen ist die Kombination aus dem weniger wahrscheinlichen Auftreten der Kohlenwasserstoffmengen und der weniger wahrscheinlichen Wegsamkeit auszuschließen und als Alternativszenarium nicht zu betrachten. Insgesamt sind die zu betrachtenden Alternativszenarien damit die gleichen wie in der Einlagerungsvariante AB1 (Tab. 6.25).

#### **6.3.4.2 Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.2 zu diesem FEP gelten auch hier. Die zu betrachtenden Alternativszenarien entsprechen denjenigen der Einlagerungsvariante AB1 (Tab. 6.25).

#### **6.3.4.3 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.3 zu diesem FEP gelten auch hier. Die zu betrachtenden Alternativszenarien entsprechen denjenigen der Einlagerungsvariante AB1 (Tab. 6.25).

#### **6.3.4.4 Kanalisierung in Dichtelementen**

Die Aussagen für die Einlagerungsvariante AB1 aus Kapitel 6.1.4.4 zu diesem FEP gelten auch hier. Die Auswirkungen der Kanalisierung in Dichtelementen werden durch die FEP *Vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* abgedeckt, so dass keine weiteren Alternativszenarien zu betrachten sind.

### 6.3.4.5 Zusammenfassung

Die Betrachtung aller weniger wahrscheinlichen FEP des FEP-Katalogs führt zu zwei Alternativszenarien, die im Rahmen von Konsequenzenanalysen zu betrachten sind (Tab. 6.27). Sie basieren auf den FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses*. Die Auswirkungen des FEP *Kanalisation in Dichtelementen* werden durch diese beiden Alternativszenarien abgedeckt. Die Auswirkungen des FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* werden durch das Alternativszenarium A3a3 abgedeckt (Kapitel 6.3.1.3).

**Tab. 6.27** Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP für die Einlagerungsvariante AC

FEP-Nr.	Alternativszenarium	Beeinträchtigte Initial-Barriere **	Erläuterungen	Bezug
2.1.07.05	A3w1 (entspricht A1w1): Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	SchV	Frühzeitig* erhöhte Durchlässigkeit eines Schachtverschlusses Varianten: Versagen zu Beginn der Nachverschlussphase; Versagen später	219
2.1.07.06	A3w2 (entspricht A1w2): Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	StrV	Frühzeitig* erhöhte Durchlässigkeit eines Streckenverschlusses Varianten: StrV im Ostflügel; StrV im Westflügel; StrV in der Verbindung der beiden Flügel	219

\* Frühzeitig bedeutet: früh im Verhältnis zur vorgesehenen Funktionszeit des Verschlusses

\*\* SchV „Schachtverschluss“; StrV „Streckenverschluss“

## **7 Zusammenfassung**

### **Ziel/Aufgabe**

In einer Szenarientwicklung sind die möglichen Entwicklungen, die ein Endlagersystem über den zugrunde liegenden Nachweiszeitraum nehmen kann und die für die Beurteilung der Sicherheit von Endlagern relevant sind, in einem systematischen Prozess möglichst umfassend abzuleiten und zu beschreiben.

Die Szenarientwicklung sollte für die drei im Vorhaben VSG betrachteten Einlagerungsvarianten AB1, AB2 und AC durchgeführt werden. Diese Einlagerungsvarianten bestehen jeweils aus einer Kombination der Kammerlagerung (Variante A) mit der horizontalen Streckenlagerung (Variante B1), der horizontalen Bohrlochlagerung (Variante B2) oder der vertikalen Bohrlochlagerung (Variante C).

### **Vorgehensweise**

Die Szenarientwicklung erfolgte nach einer Methodik, die eine systematische Vorgehensweise zur Ableitung des Referenzszenariums und der Alternativszenarien für die jeweilige Einlagerungsvariante ermöglicht.

Ein Referenzszenarium beinhaltet jeweils eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems. Die Alternativszenarien sind davon abweichende Entwicklungsmöglichkeiten, wobei sich jedes Alternativszenarium in genau einem Aspekt (zusätzliches FEP, geänderte spezifische Annahme oder Ausprägung eines FEP) vom Referenzszenarium unterscheidet.

Bei der Darstellung der Methodik der Szenarientwicklung wurden zunächst die Grundlagen der Szenarientwicklung, wie Rahmenbedingungen, Standortbeschreibung und geowissenschaftliche Langzeitprognose, grundlegende Annahmen, Abfallspezifikation etc., angesprochen. Es wurde erläutert, wie die Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen eingeordnet werden. Hierzu wurde ein Ansatz entwickelt, der die Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich Eintretens und Ausprägung der bestimmenden FEP eines Szenariums berücksichtigt.

Die Ausgangssituation am Standort ist die Basis der Szenarientwicklung. Zur Beschreibung der Ausgangssituation wurden Informationen über die gegenwärtige geolo-

gische Situation, das Abfallinventar und die konzeptionellen Planungen für die Einlagerungsvarianten zusammengestellt.

Eine wesentliche Grundlage für die methodische Vorgehensweise bildet der FEP-Katalog /WOL 12b/, in dem die Initial-FEP (wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion von Initial-Barrieren des Endlagersystems) sowie die FEP *Radionuklidmobilisierung* und *Radionuklidtransport* und deren Abhängigkeiten zu anderen FEP ausgewiesen sind.

Weiterhin wurden zur Entwicklung der Referenzszenarien Randbedingungen festgelegt, zu denen die Festlegung eines Klimabildes und weitere spezifische Annahmen gehören.

## **Ergebnisse**

Unter Einbeziehung der genannten Grundlagen, der Ausgangssituation am Standort, des FEP-Kataloges und der Randbedingungen wurden für die drei Einlagerungsvarianten zunächst die Referenzszenarien R1, R2 und R3 entwickelt. Die Beschreibung dieser Szenarien ist dabei jeweils nach den Teilsystemen „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ sowie „Deck- und Nebengebirge“ gegliedert. Die Szenarien wurden dabei aus den Initial-FEP und deren Abhängigkeiten abgeleitet, wobei auch die zeitlichen Entwicklungen sowie zeitlichen Beschränkungen einzelner FEP aufgezeigt wurden. Zusätzlich erfolgte die Diskussion einer möglichen Mobilisierung von Radionukliden und eines Transportes von Radionukliden.

Auf Basis des jeweiligen Referenzszenariums wurden die Alternativszenarien für die drei Einlagerungsvarianten nach vier verschiedenen Ansatzpunkten abgeleitet: aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen (Ansatzpunkt 1), aus den Initial-FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung (Ansatzpunkt 2), aus den FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport ebenfalls mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung (Ansatzpunkt 3) und aus den weniger wahrscheinlichen FEP (Ansatzpunkt 4).

Für jede Einlagerungsvariante resultieren aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen fünf Alternativszenarien. Aus der Betrachtung der weniger wahrscheinlichen Ausprägungen von Initial-FEP ergaben sich jeweils acht Alternativszenarien und je ein weiteres Alternativszenarium hinsichtlich der Radionuklidmobilisierung. Aus der Betrachtung der weniger wahrscheinlichen FEP wurden jeweils zwei Alterna-

tivszszenarien abgeleitet. Daraus ergeben sich für jede Einlagerungsvariante insgesamt ein Referenzszenarium und 17 Alternativszszenarien (Tab. 7.1). Alle abgeleiteten Alternativszszenarien sind weniger wahrscheinlich.

Die Referenz- und Alternativszszenarien sind die Basis für die Integritätsanalyse und die Analyse der radiologischen Konsequenzen. Zur Durchführung der Analysen sind die Szenarien entsprechend in Rechenfälle umzusetzen.

## **Offene Fragen**

In dem vorliegenden Bericht wurde eine Methodik zur Ableitung von Szenarien vorgestellt und auf drei Einlagerungsvarianten angewandt. Die Methode orientiert sich an dem Ziel, Szenarien zu entwickeln, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers während der Nachverschlussphase relevant sind und setzt dies u. a. mit Hilfe der Initial-FEP um. Aufgrund dieser Vorgehensweise ergibt sich ein großes Vertrauen in das hier vorliegende Ergebnis der Szenarientwicklung. Im Rahmen der methodischen Anwendung und der fachlichen Diskussion sind jedoch Fragen aufgekomen, die im Folgenden thematisiert werden:

- **Diversitärer Ansatz zur Stützung der Methodik**

Ein Nachweis dafür, dass die entwickelten Szenarien abdeckend sind, lässt sich vermutlich niemals führen, da sich die Methodik der Szenarientwicklung und die darin einzubeziehenden Grundlagen immer nur auf den vorliegenden Kenntnisstand stützen können und sich bestehende Ungewissheiten hinsichtlich zukünftiger Abläufe nicht in Gänze ausräumen lassen. Zur Stützung der Methodik könnte ein diversitärer Ansatz sinnvoll sein, das heißt, es sollte anhand von vorhandenen oder noch zu entwickelnden Methoden geprüft werden, ob die Ableitung der Szenarien auf alternative Art und Weise reproduzierbar ist. Es ist zu erwarten, dass dadurch mögliche Optimierungsansätze bzw. Schwachstellen der hier angewandten Methodik aufgezeigt werden können.

- **Verfahren zur Gruppierung von Szenarien**

Im vorliegenden Bericht wird an einigen Beispielen dargestellt, dass ähnlich ablaufende Entwicklungen gruppiert werden können und dass zur umfassenden Behandlung ein repräsentatives Szenarium identifiziert bzw. bereitgestellt werden kann. Bei den hier dargestellten repräsentativen Szenarien wird zwar davon ausgegangen, dass sie für alle ähnlich ablaufenden Entwicklungen abdeckend sind,

dies wurde aber nicht systematisch erarbeitet. In der Zukunft ist daher ein Verfahren für eine systematische Gruppierung zu entwickeln, die zu zuverlässig repräsentativen Szenarien führt.

- **Vorgehensweise zur Ermittlung von abdeckenden Rechenfällen**

Auch hinsichtlich der Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle wird Entwicklungsbedarf gesehen, der sich auf die Nachweisführung und Darstellbarkeit einer umfassenden Behandlung der Szenarien durch definierte Rechenfälle bezieht. Dieser Aspekt berührt sowohl die Szenarientwicklung als auch die rechen- bzw. modelltechnische Umsetzung. Ähnlich wie bei der genannten Gruppierung von Szenarien und der Darstellung dieser Gruppe durch ein repräsentatives Szenarium ist auch für Rechenfälle eine entsprechende Vorgehensweise vorstellbar. Hierzu wären Kriterien aufzustellen oder eine systematische Vorgehensweise zu erarbeiten, um abdeckende Rechenfälle ermitteln und eine umfassende Behandlung der zu untersuchenden Szenarien gewährleisten zu können.

### **Fazit/Ausblick**

Im Vorhaben VSG wurde die hier vorgestellte Methode der Szenarientwicklung erstmals angewandt. Damit die Methode in Genehmigungsverfahren herangezogen werden kann, müssen die angesprochenen offenen Fragen beantwortet werden. Da ein Safety Case für ein Genehmigungsverfahren ein iteratives Vorgehen erfordert, bei dem auch die Wechselwirkung der Modelle mit den Szenarien eine Rolle spielt, können auch einige der offenen Fragen im Verlauf des zukünftigen Safety Case bearbeitet werden.

**Tab. 7.1** Übersicht aller Szenarien für die Einlagerungsvarianten AB1, AB2 und AC

Szenarium	Basis des Szenariums	Abkürzung für die Einlagerungsvariante		
		AB1	AB2	AC
Referenzszenarium	Alle Initial-FEP	R1	R2	R3
Ansatzpunkt 1: Alternativszenarien aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen	spez. Annahme „Klimaentwicklung“: zwei glaziale Rinnen	A1a1	A2a1	A3a1
	spez. Annahme „Klimaentwicklung“: glaziale Rinne, die nicht dem Verlauf der Gorlebener Rinne folgt	A1a2	A2a2	A3a2
	spez. Annahme „Sicherheitsabstand“: unterschritten wegen Fehlinterpretation der Erkundungsergebnisse	A1a3	A2a3	A3a3
	spez. Annahme „Sicherheitsabstand“: unterschritten wegen unentdeckter Klüfte	A1a4	A2a4	A3a4
	spez. Annahme „Erkundungssohle“	A1a5	A2a5	A3a5
Ansatzpunkt 2: Alternativszenarien aus Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	Initial-FEP Glaziale Rinnenbildung	A1i1	A2i1	A3i1
	Initial-FEP Versagen eines Brennelement-Behälters	A1i2	A2i2	A3i2
	Initial-FEP Konvergenz	A1i3	A2i3	A3i3
	Initial-FEP Metallkorrosion	A1i4	A2i4	A3i4
	Initial-FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	A1i5	A2i5	A3i5
	Initial-FEP Fluidvorkommen im Wirtsgestein	A1i6	A2i6	A3i6
	Initial-FEP Thermochemische Sulfat-reduktion	A1i7	A2i7	A3i7
	Initial-FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	A1i8	A2i8	A3i8
	Initial-FEP Subrosion	A1i9	A2i9	A3i9
Ansatzpunkt 3: Alternativszenarien aus FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	FEP Radionuklidmobilisierung	A1m1	A2m1	A3m1
Ansatzpunkt 4: Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP	w. w. FEP Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	A1w1	A2w1	A3w1
	w. w. FEP Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	A1w2	A2w2	A3w2



## Literaturverzeichnis

- /ASE 68/ Aseev, A.A.: Dynamik und geomorphologische Wirkung der europäischen Eisschilde. Petermanns geogr. Mitt., Vol. 112, S. 112-115, 1968.
- /ASE 74/ Aseev, A.A.: Drevnie materikovyje olodnenenija Evropy. [Alte Festlandsvereisungen Europas]. Inst. Geografii, S. 318, 1974.
- /ASE 78/ Aseev, A.A.: Aufbau und großregionale Wirkung von Inlandvereisungen. (Die Grundlagen einer allgemeinen Theorie der glazialen Litho- und Morphogenese). Schriftenreihe geol. Wiss., Vol. H. 9, S. 61-67, 1978.
- /BER 63/ Bernhard, H.: Der Drucksetzungsversuch als Hilfsmittel zur Ermittlung der Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises in Nordwestniedersachsen. In: Mitt. Geol. Inst. Univ. Hannover, Vol. 1, 168 Seiten, T. H. Hannover: Hannover, 1963.
- /BGR 03/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Hannover, 2003.
- /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 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 93/ Bornemann, O., Fischbeck, R.: Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen. Geologisches Jahrbuch, Vol. Reihe A, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1993.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BOU 85/ Boulton, G.S., Smith, G.D., Jones, A.S., Newsome, J.: Glacial geology and glaciology of the last mid-latitude ice sheets., Vol. 142, 447-474 Seiten, DOI 10.1144/gsjgs.142.3.0447., J. geol. Soc. London: London, 1985.
- /BRA 12/ Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe "Kohlenwasserstoffe", Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, ISBN: 978-3-939355-61-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /CEN 02/ CEN – Europäisches Komitee für Normung: Grundlagen der Tragwerksplanung. DIN EN 1990:2002: Brüssel, 2002.
- /FEL 02/ Feldmann, L.: Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. Clausthaler Geowissenschaften, Vol. 1, No. X, 2002.
- /FOR 99/ Forsström, L.: Future glaciation in Fennoscandia. POSIVA 99-30, 31 Seiten, Posiva OY: Helsinki, September 1999.

- /FOR 03/ Forsström, P.-L., Sallasmaa, O., Greve, R., Zwinger, T.: Simulation of fast-flow features of the Fennoscandian ice sheet during the Last Glacial Maximum. In: Annals of Glaciology, Vol. 37, 383-389 Seiten, International Glaciological Society, 2003.
- /GRA 12/ Graf, R., Brammer, K.J., Filbert, W.: Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern - ein umsetzbares technisches Konzept -. Jahrestagung Kerntechnik, 2012.
- /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.
- /KAL 92/ Kaltwang, J.: Die pleistozäne Vereisungsgrenze im südlichen Niedersachsen und im östlichen Westfalen. Mitt. Geol. Inst. Univ. Hannover, Vol. 33, S. 161, 1992.
- /KEL 09/ Keller, S.: Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. ISBN 978-3-9813373-3-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2009.
- /KÖT 03/ Köthe, A., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil I: Deckgebirge Geologie. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G3411900000, 255 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2003.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.

- /LAM 06/ Lambeck, K., Purcell, A., Funder, S., Kjær, K.H., Larsen, E., Möller, P.: Constraints on the Late Saalian to early Middle Weichselian ice sheet of Eurasia from field data and rebound modelling. In: *Boreas*, Vol. 35, 539-575 Seiten: Oxford.
- /LAM 10/ Lambeck, K., Purcell, A., Zhao, J., Svensson, N.-O.: The Scandinavian Ice Sheet: from MIS 4 to the end of the Last Glacial Maximum. In: *Boreas*, Vol. 39, 410–435 Seiten, ISSN 0300-9483, DOI 10.1111/j.1502-3885.2010.00140.x: Oxford, 2010.
- /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.
- /LÜT 08/ Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., Stocker, T.F.: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, Vol. 453, S. 379 - 382, DOI 10.1038/nature06949, 2008.
- /MIN 10/ Minkley, W., Popp, T.: Sicherheitsabstände zur vorläufigen Dimensionierung eines untertägigen Endlagers für wärme-entwickelnde Abfälle im Salzgebirge. Memo zum Arbeitspaket 9, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IFG): Köln, 2010.
- /MÖH 11/ Mönig, H.: Literaturstudie zur Metallkorrosion im Rahmen der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2011.

- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, ISBN: 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, ISBN 978-3-939355-51-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MÜL 12b/ 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.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2011.
- /SAC 97/ Sachs, L.: Angeandte Statistik. 8. Edition, Anwendung statistischer Methoden, 881 Seiten, ISBN 3-540-60494-4, Springer-Verlag: Klausdorf, 1997.

- /SIE 04/ Siebert, M.J., Dowdeswell, J.A.: Numerical reconstructions of the Eurasian Ice Sheet and climate during the Late Weichselian. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 23, S. 1273–1283, DOI 10.1016/j.quascirev.2003.12.010., 2004.
- /SKB 10/ Svensk Karnbranslehantering AB (SKB): Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, 328 Seiten: Stockholm, 2010.
- /WOL 12a/ 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. Konzept und Aufbau. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /WOL 12b/ 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.
- /ZÖF 88/ Zöfel, P.: Statistik in der Praxis. 2. Edition, Statistik, 426 Seiten, ISBN 3-437-40203-X, Gustav-Fischer-Verlag: Marburg, 1988.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Schematische Darstellung der Elemente der Methodik zur Szenarienentwicklung .....	9
Abb. 3.2	Schematische Darstellung der einzubeziehenden Abhängigkeiten zur Bestimmung der Ausprägung von Initial-FEP .....	18
Abb. 3.3	Schematische Darstellung der einzubeziehenden Abhängigkeiten am Beispiel des Initial-FEP <i>Glaziale Rinnenbildung</i> .....	20
Abb. 3.4	Darstellung der möglichen Wahrscheinlichkeitsklassen (gelbe Markierung) der unterschiedlichen Szenarien .....	29
Abb. 3.5	Schematische Darstellung von der Entwicklung von Szenarien bis zur rechentechnischen Auswertung und Synthese der Ergebnisse .....	32
Abb. 4.1	Schematischer Querschnitt durch den Salzstock Gorleben (basierend auf /BOR 91/ geändert in /ISI 08/) .....	34
Abb. 4.2	Konzept des Grubengebäudes für die Einlagerungsvariante AB1 (nach /BOL 12/) .....	40
Abb. 4.3	Position der Streckenverschlüsse auf der 870-m-Sohle /BOL 12/ .....	42
Abb. 4.4	Anordnung der Funktionselemente des Schachtverschlusses gemäß /MÜL 12a/ .....	44
Abb. 4.5	Schematische Darstellung eines Einlagerungsfeldes für 70 TLB in der Variante B2 /BOL 12/ .....	46
Abb. 4.6	Darstellung der Einlagerungsvariante AC /BOL 12/ .....	48
Abb. 5.1	Das Klimabild für das Referenzszenarium .....	51
Abb. 5.2	Tendenzielle Darstellung der zeitlichen Entwicklung einiger Aspekte .....	82
Abb. 6.1	Angenommene geologische Struktur des Erkundungshorizontes (840 m Teufe) am Standort Gorleben mit eingezeichnetem Sicherheitsabstand (blaue Linie) (aus /BOL 11/ entnommen) .....	124
Abb. 6.2	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: beeinflussende FEP .....	178

Abb. 6.3	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: beeinflussende FEP.....	181
Abb. 6.4	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: beeinflussende FEP .....	184
Abb. 6.5	Kanalisation in Dichtelementen: beeinflussende FEP .....	187

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Initial-FEP für die Einlagerungsvariante AB1 .....	17
Tab. 3.2	Weniger wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere .....	24
Tab. 3.3	Kennzeichnung der Szenarien .....	25
Tab. 4.1	Übersicht über die in den Einlagerungsvarianten benötigten Versatzmengen /BOL 12/.....	38
Tab. 4.2	Hydraulische Kennwerte der Funktionselemente des Schachtverschlusses gemäß /MÜL 12a/.....	43
Tab. 5.1	Zusammenstellung von orientierenden Kenndaten für die drei am Standort Gorleben zu betrachtenden Kaltzeittypen .....	53
Tab. 5.2	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP.....	56
Tab. 5.3	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP .....	62
Tab. 5.4	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP .....	70
Tab. 5.5	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP.....	75
Tab. 5.6	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Radionuklidmobilisierung</i> .....	77
Tab. 5.7	Beeinflussende FEP für die FEP <i>Radionuklidtransport in der flüssigen Phase</i> und <i>Radionuklidtransport in der Gasphase</i> .....	80
Tab. 5.8	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (hervorgehobene unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung) .....	87

Tab. 5.9	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung) .....	90
Tab. 5.10	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung) .....	91
Tab. 5.11	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP.....	92
Tab. 5.12	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Radionuklidmobilisierung</i> (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung) .....	93
Tab. 5.13	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung).....	97
Tab. 5.14	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung) .....	101
Tab. 5.15	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung) .....	103
Tab. 5.16	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP.....	104
Tab. 5.17	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Radionuklidmobilisierung</i> (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung) .....	105
Tab. 5.18	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Radionuklidtransport</i> (unterstrichene FEP haben im Vergleich zur Variante B1 eine unterschiedliche Ausprägung).....	107
Tab. 6.1	Referenzszenarium und mögliche alternative Betrachtungsfälle von der spez. Annahme (Daten wurden aus dem FEP-Katalog entnommen /WOL 12b/).....	117

Tab. 6.2	Zusammenstellung abgeleiteter Alternativszenarien aus alternativen Betrachtungen zu spezifischen Annahmen; Einlagerungsvariante AB1 .....	136
Tab. 6.3	Subrosion: resultierende und beeinflusste FEP .....	141
Tab. 6.4	Glaziale Rinnenbildung: resultierende und beeinflusste FEP .....	144
Tab. 6.5	Versagen eines Brennelement-Behälters: resultierende und beeinflusste FEP.....	146
Tab. 6.6	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen: resultierende und beeinflusste FEP.....	148
Tab. 6.7	Konvergenz: resultierende und beeinflusste FEP.....	150
Tab. 6.8	Lageverschiebung des Schachtverschlusses: resultierende und beeinflusste FEP.....	153
Tab. 6.9	Quellen des Bentonits: resultierende und beeinflusste FEP .....	155
Tab. 6.10	Metallkorrosion: resultierende und beeinflusste FEP .....	157
Tab. 6.11	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen: resultierende und beeinflusste FEP .....	159
Tab. 6.12	Auflockerungszone: resultierende und beeinflusste FEP .....	162
Tab. 6.13	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein: resultierende und beeinflusste FEP .....	164
Tab. 6.14	Fluidvorkommen im Wirtsgestein: resultierende und beeinflusste FEP .....	167
Tab. 6.15	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein: resultierende und beeinflusste FEP.....	169
Tab. 6.16	Thermochemischen Sulfatreduktion: resultierende und beeinflusste FEP .....	170
Tab. 6.17	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein: resultierende und beeinflusste FEP .....	172
Tab. 6.18	Szenarien aus Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen .....	174

Tab. 6.19	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen: beeinflusste FEP .....	178
Tab. 6.20	FEP und spezifische Annahmen, die anderweitig abgeleiteten Alternativszenarien zugrunde liegen, welche durch das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ repräsentiert werden.....	182
Tab. 6.21	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses: resultierende und beeinflusste FEP.....	183
Tab. 6.22	FEP und spezifische Annahmen, die anderweitig abgeleiteten Alternativ-szenarien zugrunde liegen, welche durch das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ repräsentiert werden .....	185
Tab. 6.23	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses: beeinflusste FEP .....	186
Tab. 6.24	Kanalisation in Dichtelementen: beeinflusste FEP .....	188
Tab. 6.25	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP für die Einlagerungsvariante AB1 .....	192
Tab. 6.26	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP für die Einlagerungsvariante AB2 .....	206
Tab. 6.27	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP für die Einlagerungsvariante AC .....	220
Tab. 7.1	Übersicht aller Szenarien für die Einlagerungsvarianten AB1, AB2 und AC .....	225

## **Anhänge**

Die begleitenden Anhänge A „Initial-FEP: Einflüsse auf die Ausprägung“, B „Weniger wahrscheinliche FEP: Einflüsse auf die Ausprägung“, C „Darstellung der Einfluss nehmenden FEP auf die Initial-FEP“ und D „Erkundungsbohrungen im Salzstock Gorleben“ sind auf der beigefügten CD abgelegt.

**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](http://www.grs.de)

**Bundesanstalt für Geowissen-  
schaften und Rohstoffe**  
Stilleweg 2  
30655 Hannover

**DBE TECHNOLOGY GmbH**  
Eschenstraße 55  
31224 Peine

**ISBN 978-3-939355-60-1**



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## **Anhang A**

### **Initial-FEP: Einflüsse auf die Ausprägung**

August 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beschreibung der Ausprägungen der Initial-FEP.....</b>	<b>4</b>
2.1	Erdbeben.....	4
2.2	Diapirismus.....	6
2.3	Subrosion .....	9
2.4	Bildung kryogener Klüfte.....	15
2.5	Glaziale Rinnenbildung.....	18
2.6	Versagen eines Brennelement-Behälters.....	23
2.7	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen .....	35
2.8	Konvergenz .....	51
2.9	Fluiddruck.....	70
2.10	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien .....	83
2.11	Lageverschiebung des Schachtverschlusses.....	107
2.12	Quellen des Bentonits.....	123
2.13	Auflösung und Ausfällung .....	140
2.14	Metallkorrosion .....	149
2.15	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen.....	160
2.16	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme.....	167
2.17	Auflockerungszone .....	171
2.18	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein.....	192
2.19	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung .....	197
2.20	Fluidvorkommen im Wirtsgestein .....	233
2.21	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein.....	237
2.22	Thermochemische Sulfatreduktion.....	242
2.23	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein .....	247
	<b>Literatur .....</b>	<b>255</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>261</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>263</b>



# 1 Einleitung

Die Ableitung der Einflüsse auf die Ausprägungen der Initial-FEP stellt eine wesentliche Grundlage für die Szenarientwicklung dar. In diesem Anhang erfolgen die Ableitung der Einflüsse und eine vertiefte Darstellung der Ausprägungen der FEP zum besseren Verständnis der im Referenzszenarium beschriebenen Systementwicklung. Der Anhang beinhaltet die ausführliche Darstellung der Initial-FEP in Bezug auf ihre Wechselwirkung mit auslösenden und beeinflussenden FEP. Die Intention hierbei ist, eine Einschätzung der zu erwartenden (wahrscheinlichen) Ausprägung des jeweiligen betrachteten Initial-FEP unter Einbeziehung identifizierter Einflüsse und Wechselwirkungen vornehmen zu können.

Die Ausprägung beinhaltet eine qualitative oder quantitative Charakterisierung der Intensität des jeweiligen Initial-FEP, wobei folgende Fälle unterschieden werden können:

- Es kann für die Ausprägung des Initial-FEP ein erwarteter Wert oder Wertebereich angegeben werden.
- Es kann eine Ausprägung für das Initial-FEP angegeben werden, ohne diese jedoch eindeutig einem bestimmten Erwartungswert zuordnen zu können. In solchen Fällen wird eine repräsentative Ausprägung für das Initial-FEP angegeben.
- Es kann keine Ausprägung für das Initial-FEP angegeben werden, da diese sich aus der jeweils betrachteten Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems erst ergibt.<sup>1</sup>

Die Diskussion, Darstellung und Beschreibung der bezugnehmenden Initial-FEP folgt einer systematischen Vorgehensweise und einheitlichen Struktur. Für jedes Initial-FEP ist folgende Darstellungsweise und inhaltliche Ausgestaltung vorgesehen:

Unter dem entsprechenden Eingangskapitel des Initial-FEP erfolgt

- eine kurze Beschreibung des FEP,

---

<sup>1</sup> In einer Reihe von Fällen wird darauf hingewiesen, dass Änderungen der Ausprägung im Vergleich der Einlagerungsvarianten untereinander erwartet werden, jedoch können keine konkreten Angaben und auch keine qualitativen Angaben hinsichtlich der Ausprägungsrichtung, z. B. höher oder niedriger, erfolgen. Derartige Angaben lassen sich erst durch die Untersuchung mittels Prozessanalysen ausführen.

- die Benennung der Initial-Barriere(n), die von dem Initial-FEP beeinträchtigt werden,
- die Angabe, worauf sich die Ausprägung bezieht,
- eine Übersicht (Tabellenform) von auslösenden und beeinflussenden FEP (1. Ebene) auf das Initial-FEP und
- eine Bewertung der Ausprägung.

Obwohl die Bewertung der Ausprägung erst in den Beschreibungen der FEP-Abhängigkeiten in den Unterkapiteln abgeleitet wird, wird sie bereits in das Eingangskapitel des Initial-FEP vorgezogen. Der Grund hierfür ist, frühzeitig die Einschätzung zur Ausprägung des Initial-FEP zu vermitteln, ohne dass hierzu eine intensive Auseinandersetzung mit fachlicher Diskussion erfolgen muss. Die Unterkapitel bilden die Basis der Bewertung und dienen dazu, sich einen vertieften Überblick zu den Wechselwirkungen und Einflüssen auf das jeweilige Initial-FEP zu verschaffen.

In den darauf folgenden Unterkapiteln erfolgt die o. g. Diskussion der Einflüsse auf das Initial-FEP getrennt nach den einzelnen auslösenden FEP (1. Ebene) und den einzelnen beeinflussenden FEP (1. Ebene). Die hinsichtlich ihres Einflusses vernachlässigbaren FEP der 1. Ebene werden in einem gesonderten Unterverzeichnis ausgewiesen. D. h., es wird für diese FEP der vernachlässigbare Charakter begründet dargelegt. Weiterhin werden für jedes FEP der 1. Ebene die auslösenden und beeinflussenden FEP der 2. Ebene in die Diskussion mit einbezogen, wobei diejenigen FEP (2. Ebene) mit einem vernachlässigbaren Einfluss kenntlich gemacht werden. In den Fällen, in denen der vernachlässigbare Einfluss nicht eindeutig ist, erfolgt zusätzlich eine entsprechende Begründung.

In der Szenarientwicklung wurden verschiedene Einlagerungsvarianten betrachtet. Der vorliegende Anhang beschreibt ebenfalls die Einflüsse auf die Initial-FEP für alle betrachteten Varianten, wobei der Fokus auf der Einlagerungsvariante AB1 liegt. Die Variante A bleibt in den Einlagerungsvarianten AB2 und AC unverändert. Der Einfluss auf die Initial-FEP für die Varianten B2 und C wird dann ausgewiesen, wenn eine Abweichung gegenüber der Variante B1 vorliegt. D. h., wenn keine variantenspezifischen Angaben erfolgen, dann sind die unter B1 gemachten Ausführungen ebenfalls für die Varianten B2 und C gültig.

Die in diesem Anhang gemachten Angaben zu Zahlen-Werten bzw. Wertebereiche wurden, wenn nicht anders ausgewiesen, dem FEP-Katalog /WOL 12/ entnommen.

Im Folgenden werden die in der Tabelle A.1 aufgeführten Initial-FEP nach der oben beschriebenen Struktur abgehandelt:

**Tab. 1.1** Tabelle A.1: Initial-FEP

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

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

## 2 Beschreibung der Ausprägungen der Initial-FEP

### 2.1 Erdbeben

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

Erdbeben kommen nicht gleichmäßig verteilt vor, sondern konzentrieren sich auf bestimmte, durch Besonderheiten im geologischen Bau oder in ihrer geologischen Entwicklung charakterisierte Gebiete. Für die Bundesrepublik Deutschland wurde eine erdbebengeographische Einteilung vorgenommen /LEY 86/, /LEY 98/, die die einzelnen Gebiete nach den Intensitäten des stärksten Bebens und der Tiefe der meisten Erdbebenherde voneinander abgrenzen.

Aus der geologischen Gesamtsituation ergeben sich keine Hinweise auf ein erhöhtes Erdbebenaufkommen, das Auswirkungen auf ein verschlossenes und verfülltes Endlager haben könnte. Auswirkungen von Erdbeben auf Salzstöcke sind unbekannt bzw. wurden anhand von geologischen Merkmalen bisher nicht nachgewiesen. Dennoch werden Erdbeben berücksichtigt, um die Auswirkungen stärkerer Erdbeben auf das Endlagersystem zu prüfen. Für diese Zwecke wird eine Beeinträchtigung des Wirtsgesteins unterstellt. Nach Ergebnissen von Langzeitprognosen zum Auftreten von Erdbeben wird für den Standort Gorleben ein Bemessungserdbeben von 7,3 auf der MSK-Skala zu Grunde gelegt /AHO 89/, /STE 96/.

Die Ausprägung von Erdbeben bezieht sich nur auf die Stärke eines Bebens. Das Bemessungserdbeben der Stärke 7,3 MSK deckt sowohl alle tektonischen Erdbeben als auch die natürlichen Einsturzbeben im Standortbereich ab und wird für die Vorbemessung und im Referenzszenarium verwendet. Eine Angabe hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit der Ausprägung kann nicht gemacht werden, so dass das Bemessungserdbeben für die Zwecke der Szenarienentwicklung die repräsentative Ausprägung darstellt. Der FEP-Katalog enthält keine auslösende und beeinflussende FEP für das FEP Erd-

beben, da er nicht umfänglich alle Prozesse beschreiben kann, die zu einem Erdbeben führen.

Die Schacht- und Streckenverschlüsse sind gegen solche Erdbebenintensitäten ausgelegt. Im Referenzszenarium ist daher keine Beeinträchtigung der Barrierenfunktion der Schacht- und Streckenverschlüsse durch ein Erdbeben zu unterstellen.

Geologische Befunde haben bislang keine Hinweise darauf gegeben, dass durch Erdbeben intaktes Salzgestein geschädigt wurde /MIN 10/. Im Referenzszenarium haben daher Erdbeben keinen Einfluss auf die Barrierenfunktion des Wirtsgesteins.

Die Ausprägung ist für alle drei Einlagerungsvarianten gleich.

#### **2.1.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

#### **2.1.2 Beeinflussende FEP**

Es wurden keine beeinflussenden FEP identifiziert.

#### **2.1.3 Nicht berücksichtigte FEP**

Keine.

## 2.2 Diapirismus

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

Trotz der geringen Salzbewegungen sind strukturelle Veränderungen im Bereich aller Endlagerteilsysteme denkbar, so dass mögliche Auswirkungen berücksichtigt werden müssen. Durch die Bewegung des Salzgesteins ergeben sich direkte Beeinträchtigungen auf die Initial-Barrieren.

Die gegenwärtigen Aufstiegsraten des Salzstocks werden mit den Raten im Zeitraum Miozän bis Quartär abgeschätzt. Diese sind klein, da nur noch wenig Restsalz in den Randsenken als Nachschub zur Verfügung steht. Somit ist ein rascher Salzaufstieg mittels salztektonischer Prozesse nicht zu betrachten.

Die neotektonische Situation lässt verstärkte kompressive Spannungsverhältnisse, die Auswirkungen auf den Salzaufstieg hätten, nicht wahrscheinlich erscheinen. Ein Salzaufstieg aufgrund von Tektonik ist ebenfalls nicht zu betrachten.



**Abb. 2.1** Ausprägung des FEP *Diapirismus*

Die Eigenschaften des Wirtsgesteins werden für die Ausprägung des FEP *Diapirismus* als bestimmend identifiziert.

Der Salzstock Gorleben befindet sich im Nachdiapistadium, das durch geringe Salzaufstiegsraten gekennzeichnet ist. Für den Zeitraum Miozän bis rezent wurden Raten für die Hebung der Salzstockoberfläche (200 – 300 m Tiefe) von ca. 0,02 mm/a bestimmt /ZIR 91/, /ZIR 96/. Beim Salzaufstieg traten im Bereich des Hauptsalzes in Hö-

he der geplanten Einlagerungssohle in 870 – 900 m Tiefe Salzfließgeschwindigkeiten von ca. 0,07 mm/a im Zeitraum Miozän bis Quartär auf.

Für das Referenzszenarium kann davon ausgegangen werden, dass sich der Abschwächungstrend des Salzaufstieges (Diapirismus) fortsetzt, da der Salzstock Gorleben in einem tektonisch ruhigen Bereich liegt und nicht mit einem Aufbau hoher kompressiver Spannungen im Untergrund zu rechnen ist. Ebenso ist nicht damit zu rechnen, dass im Nachweiszeitraum zusätzliche Sedimentmächtigkeiten von mehreren 100 Metern zur Ablagerung kommen, die über die Erhöhung des Auflastdrucks in den Randsenken zu deutlich gesteigerten Aufstiegsraten führen würden. Für den gesamten Salzstock ist von einer Aufstiegsrate von 0,02 mm/a auszugehen.

Die Ausprägung ist für alle drei Einlagerungsvarianten gleich.

### **2.2.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### **2.2.2 Beeinflussende FEP**

#### **2.2.2.1 Wirtsgestein**

Die rheologischen Eigenschaften der Salzgesteine, ihre Zusammensetzung, strukturelle und tektonische Situation, die Salzvorräte in den Randsenken sowie ihre Tiefenlage sind entscheidend für die Ausprägung eines zukünftigen Salzaufstiegs.

*Fluidvorkommen im Wirtsgestein, Wärmeproduktion, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Auflösung und Ausfällung* haben einen Einfluss auf die Viskosität von Salzgesteinen und somit auch auf den Diapirismus.

**Tab. 2.1** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

<b>Beeinflussende FEP</b>	<b>Fluidvorkommen im Wirtsgestein</b>
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungs-umlagerung	Diapirismus

### 2.2.3 Nicht berücksichtigte FEP

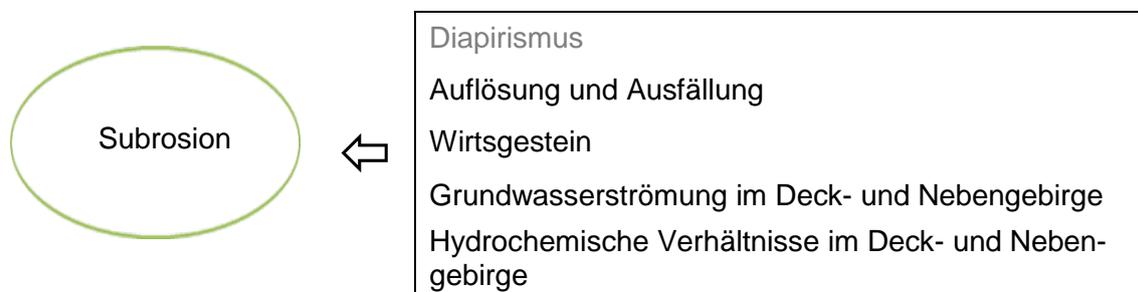
*Inlandvereisung in randlicher Lage:* Möglicher Auslöser für eine Erhöhung der Rate könnte eine lang andauernde Kaltzeit mit einer mächtigen Eisüberdeckung des Standortes sein. Dabei würde die zusätzliche Eisauflast wirksam werden. Insgesamt ist ein solcher Prozess zeitlich auf den Bereich von wenigen 10.000er Jahren begrenzt und würde nicht zu einer dauerhaften Steigerung des Salzaufstieges führen. Darüber hinaus waren derartige Einflüsse auch in der Vergangenheit wirksam, so dass sie in den Abschätzungen der langfristigen Aufstiegsraten bereits enthalten sind.

## 2.3 Subrosion

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

Die Subrosion wirkt im geologischen Zeitrahmen in unterschiedlichem Ausmaß und in Abhängigkeit von der klimatischen Entwicklung direkt auf die Initial-Barrieren „Wirtsgestein“ (Verringerung der Mächtigkeit durch Auflösung) und „Schachtverschlüsse“ (oberes Dichtelement) ein.

Die Ausprägung der Subrosion wird als Rate in mm pro Jahr oder als Gesamtverringering der Barriere im Nachweiszeitraum angegeben.



**Abb. 2.2** Ausprägung der Subrosion

Das FEP erfährt eine besondere Ausprägung durch die beeinflussenden FEP *Auflösung und Ausfällung*, *Grundwasserströmung* und *hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge*, die wiederum durch „kaltzeitliche“ FEP der zweiten Ebene beeinflusst werden. Für den Zeitraum Elster-Kaltzeit bis rezent wurden Subrosionsraten von 0,1 bis 0,2 mm/a bestimmt /BOR 08/.

Für die zukünftige Entwicklung der Subrosion am Standort Gorleben wird eine Klimaentwicklung mit Kaltzeiten von der Intensität einer Elster-, Saale- und Weichsel-Kaltzeit mit dazwischen liegenden Warmzeiten angenommen. Bestimmend für die zukünftigen Subrosionsraten und die im Nachweiszeitraum zu erwartende Tiefenwirkung der Subrosion ist insbesondere die heutige Tiefenlage des Salzspiegels. Unter Berücksichtigung der tiefen Lage des rezenten Salzspiegels und der für langfristige Zeiträume abgeleiteten Subrosionsraten wird eine Rate von 0,01 bis 0,05 mm/a /MRU 11/ (z. B. Miozän bis rezent: /KEL 90/, /ZIR 91/) abgeschätzt, bei der es in einer Million Jahre zu einer Abtragung von 10 bis 50 m Salzmächtigkeit käme. Neben der, vom am Salzspiegel

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

Die Ausprägung ist für alle drei Einlagerungsvarianten gleich.

### 2.3.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.3.2 Beeinflussende FEP

#### 2.3.2.1 Auflösung und Ausfällung

Da die Subrosion eine Ablaugung von Salzgesteinen darstellt, ist der FEP Auflösung und Ausfällung eine der zentralen Einflussgrößen.

**Tab. 2.2** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Auflösung und Ausfällung*

<b>Auslösende FEP</b>	Verdampfen von Wasser
Lösungen im Grubenbau	Wirtsgestein*
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
<b>Beeinflussende FEP</b>	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge*
Inventar: Sonstige Stoffe	Wärmeproduktion
Versatz	Komplexbildung
Verschlußmaterial	Geochemisches Milieu im Grubenbau

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die beeinflussenden FEP der zweiten Ebene *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie *Wärmeproduktion* sind für die Subrosionsvorgänge am Salzspiegel zu berücksichtigen, da sie über den Druck und die Temperatur Einfluss auf die Löslichkeiten der Salzgesteine haben.

### 2.3.2.2 Wirtsgestein

Die Salzstruktur am Referenzstandort ist aus unterschiedlichen evaporitischen Gesteinsfolgen aufgebaut, deren Salzminerale unterschiedlich gut in Wasser lösbar sind. Deshalb ist der Salzspiegel nicht eben, sondern weist entsprechend der an ihm ausstreichenden unterschiedlichen Salzgesteine ein in Höhen und Senken gegliedertes Relief auf.

**Tab. 2.3** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung*
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Glaziale Rinnenbildung:* Im Zuge der Rinnenbildung kam es im Bereich eines überkippt vorliegenden, leicht löslichen Kaliflözes zu einer tiefgreifenden „vorausgehenden“ Subrosion von ca. 90 – 130 m bis unterhalb des Salzspiegels.

Das FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion* bewirkt eine Höherlegung des Salzspiegels, was zu einer verstärkten Subrosion führt.

*Diapirismus*: Die Verlangsamung des Diapirismus und somit eine fehlende Höherlegung des Salzspiegels ist der Hauptgrund für die langsamere Subrosion.

*Störungen und Klüfte im Wirtsgestein, Bildung kryogener Klüfte*: Klüfte am Salzspiegel können kurzzeitig eine bevorzugte Wegsamkeit für Laugen darstellen, was zu einer lokal erhöhten Subrosionsrate führt. Durch die Tieferlegung des Salzspiegels nimmt die Rate in der Folge wieder ab, so dass sich die abgelagerte Salzmächtigkeit nur wenig ändert.

Fluidvorkommen im Wirtsgestein können einen Einfluss auf die Löslichkeit der Salzgesteine haben.

### 2.3.2.3 Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Das beeinflussende FEP *Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge* ist für die Bestimmung der Ausprägung des FEP *Subrosion* bedeutend, da aufgrund der Grundwasserbewegung die Zufuhr von Frischwasser an den Salzspiegel möglich ist.

**Tab. 2.4** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge*

<b>Auslösende FEP</b>	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
Deck- und Nebengebirge	Permeabilität
<b>Beeinflussende FEP</b>	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Globale klimatische Veränderungen	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge
Transgression oder Regression	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
Permafrost	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge*
Inlandvereisung in randlicher Lage	Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges
Vollständige Inlandvereisung	Topografie
Glaziale Rinnenbildung	Oberflächengewässer

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Deck- und Nebengebirge:* Die Beschaffenheit des Deckgebirges über dem Salzstock, insbesondere die Verteilung der *Permeabilitäten*, hat maßgeblichen Einfluss auf die Grundwasserströmungen. Die Permeabilität wird durch *Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge* beeinflusst.

*Oberflächengewässer und Topografie:* beeinflussen den Eintrag von Wässern von der Erdoberfläche in das Grundwassersystem des Deckgebirges.

Die restlichen FEP können zu einer Veränderung der rezenten Grundwasserströmungen führen. Insbesondere können kaltzeitliche Prozesse eine Grundwasserdynamik herbeiführen, die eine verstärkte Subrosion verursacht.

#### 2.3.2.4 Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Ein Austausch von hoch mineralisierten Grundwässern mit Süßwässern im Bereich des Salzspiegels ist Voraussetzung für Subrosion. Der FEP gibt unter anderem den Versalzungsgrad der Grundwässer wieder.

**Tab. 2.5** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge*

<b>Auslösende FEP</b>	Permafrost
Deck- und Nebengebirge	Inlandvereisung in randlicher Lage
<b>Beeinflussende FEP</b>	Vollständige Inlandvereisung
Erosion	Glaziale Rinnenbildung
Sedimentation	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge*
Diagenese	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
Subrosion	Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge
Auflösung und Ausfällung	Oberflächengewässer
Transgression oder Regression	Komplexbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Erosion* (z. B. Lösung von Gesteinen), *Transgression* (Zufuhr von Salzwasser), *Permafrost* (Entzug von Süßwasser durch Gefrieren): führen zu einer verstärkten Lösungsfracht der Grundwässer was zu einer geringen Subrosion führt.

*Sedimentation, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung, Glaziale Rinnenbildung, Oberflächengewässer, Komplexbildung:* führen zu einer geringen Lösungsfracht der Grundwässer was zu einer verstärkten Subrosion führt.

*Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge:* Mikroorganismen können durch Bildung von Schalen o. ä. dem Grundwasser Ionen entziehen, was die Lösungsfracht verringert.

*Deck- und Nebengebirge, Diagenese, Gasströmung im Deck- und Nebengebirge* subsumieren verschiedene Einflüsse auf die Hydrochemie, ohne dass klar erkennbar ist, ob sie Subrosion behindern oder begünstigen.

### **2.3.3 Nicht berücksichtigte FEP**

*Diapirismus:* Die gegenwärtigen Aufstiegsraten des Salzstocks werden mit den Raten im Zeitraum Miozän bis Quartär angenähert, diese sind mit etwa 0,02 mm/a (Hebung des Salzspiegels) klein, da nur noch wenig Restsalz in den Randsenken als Nachschub zur Verfügung steht. Die neotektonische Situation lässt verstärkten kompressiven Spannungsverhältnisse und einen zukünftigen raschen Salzaufstieg unwahrscheinlich erscheinen. Das Ausmaß des Aufstiegs unter den gegebenen tektonischen und salzstrukturellen Verhältnissen ist gegenüber anderen, z. B. klimabedingten Prozessen für die Ausprägung der Subrosion unbedeutend (siehe Beeinflussung der Ausprägung durch das FEP Wirtsgestein in Kapitel 2.3.2.2).

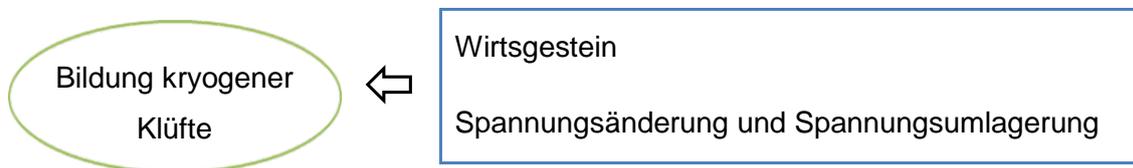
## 2.4 Bildung kryogener Klüfte

Kryogene Klüfte sind vom Salzspiegel ausgehende Trennfugen im Wirtsgestein, die genetisch im Zusammenhang mit Kaltzeiten stehen und aufgrund der damit verbundenen Abkühlung und Kontraktion zurückzuführen sind.

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

Die Ausprägung zielt hauptsächlich auf die Frage, ob sich kryogene Klüfte bilden oder nicht. Es ist denkbar dass sich im Salzgestein bei lang anhaltenden, extremen kaltzeitlichen Bedingungen Klüfte durch die Gesteinskontraktion bilden.

Die Beeinträchtigung auf die Initial-Barriere Wirtsgestein erfolgt direkt. Bis zu der erwarteten Verheilung der Klüfte ist eine Beeinträchtigung in Form von erhöhter Permeabilität zu berücksichtigen.



**Abb. 2.3** Ausprägung der Bildung kryogener Klüfte

Die Ausprägung des FEP wird über die beeinflussenden FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie das FEP *Wirtsgestein* auf Grund von klimatisch bedingten und zeitlich beschränkten Temperaturänderungen im Gebirge bestimmt.

Die Möglichkeit einer kryogenen Kluftbildung im Salzgestein norddeutscher Salzstöcke wird in verschiedenen Publikationen diskutiert. Eine Bestätigung dieser Kluftgenese als Ergebnis geologischer Untersuchungen liegt bislang nicht vor. Durch geomechanische Modellrechnungen besteht die Möglichkeit kaltzeitliche Bedingungen zu simulieren und ihre Auswirkungen auf das Salzgestein bzw. auf den Kluftbildungsprozess zu bestimmen. Eine wahrscheinliche kaltzeitliche Randbedingung für die Rechnungen wäre z. B.

die Erniedrigung der Jahresmitteltemperatur auf  $-10\text{ °C}$  im Zeitrahmen vom Ende einer Warmzeit bis zum Höhepunkt des Glazials.

Eine entsprechende kaltzeitliche Abkühlung innerhalb eines kurzen Zeitraumes von wenigen tausend Jahren wird als weniger wahrscheinlich angesehen und wird daher im Referenzszenarium nicht berücksichtigt.

Die Ausprägung ist für alle drei Einlagerungsvarianten gleich.

#### 2.4.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

#### 2.4.2 Beeinflussende FEP

##### 2.4.2.1 Spannungsänderungen und Spannungsumlagerung

**Tab. 2.6** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Versatz
Erdbeben	Verschlussmaterial
Sedimentation	Schachtverschlüsse
Diapirismus	Streckenverschlüsse
Transgression oder Regression	Konvergenz
Inlandvereisung in randlicher Lage	Fluiddruck
Vollständige Inlandvereisung	Salzgruskompaktion
Thermische Expansion oder Kontraktion	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits
Brennelement-Behälter	Wirtsgestein
Sonstige Endlagerbehälter	Deck- und Nebengebirge

Durch Klimaentwicklungen (Permafrost, vollständige Inlandvereisung) bedingte, tief reichende Temperaturänderungen innerhalb des Gebirges können zur Kontraktion, oder, bei anschließender Erwärmung, zur Expansion, der Deckgebirgsschichten und der obersten Bereiche des Wirtsgesteins sowie der oberen Teile des Schachtverschlusses führen.

*Thermische Expansion oder Kontraktion:* Die thermische Kontraktion von Salzgestein bei glazigener Abkühlung ist ein zentrales Element bei einer Bildung von kryogenen Klüften.

*Verschlussmaterial, Schachtverschlüsse, Deck- und Nebengebirge:* Veränderte Materialien in der Nähe des Salzspiegels können auch veränderte Ausdehnungskoeffizienten zur Folge haben.

#### 2.4.2.2 Wirtsgestein

Die Materialeigenschaften von Salzgesteinen, vor allem der Ausdehnungskoeffizient und die Zugfestigkeit, sind wichtige Größen um zu bestimmen, ob sich kryogene Klüfte bilden oder nicht.

**Tab. 2.7** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

#### 2.4.3 Nicht berücksichtigte FEP

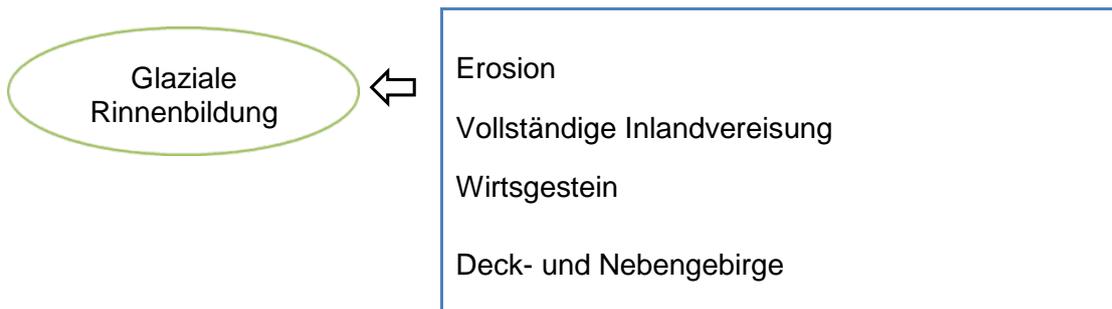
Keine.

## 2.5 Glaziale Rinnenbildung

Während der Elster-Kaltzeit kam es zu Rinnenbildungen, in deren Verlauf Lockergesteinsabfolgen bis in eine maximale Tiefe von nahezu 600 m und Festgesteine bis in Tiefen von ca. 50 m erodiert wurden. Die durchschnittlichen Rinnentiefen im Lockergestein erreichen Werte von etwa 200 bis 300 m (vgl. Quartärbasiskarte, /STA 01/). Bei einer erneuten Rinnenbildung über dem Salzstock Gorleben würde wegen der Tiefenlage des Salzspiegels die Initial-Barriere Wirtsgestein und die oberen Teile der Schachtverschlüsse beeinflusst werden.

Die *Glaziale Rinnenbildung* wird durch die FEP *Erosion*, *Vollständige Inlandvereisung*, *Wirtsgestein* und *Deck- und Nebengebirge*. Die FEP werden insgesamt als bestimmend für die Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung* angesehen.

Die das FEP *Glaziale Rinnenbildung* beeinflussenden FEP sind:



**Abb. 2.4** Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung*

Als bestimmend für die Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung* werden die petrologischen Eigenschaften von Deck- und Nebengebirge sowie dem Wirtsgestein ausgewiesen. In Lockergesteinsschichten können die Erosionsleistungen bis etwa 600 m, in Festgesteinen, hierzu wird auch das Salzgestein gezählt, etwa 50 m betragen.

Die kaltzeitlichen, im Zuge einer vollständigen Inlandvereisung ablaufenden Prozesse und Bedingungen sowie die mit ihnen verbundene Erosionsdynamik prägen das FEP *Glaziale Rinnenbildung*. Zu den Prozessen und Bedingungen gehören z. B. die Menge von unterhalb des Gletschers abfließenden Schmelz- und Grundwässern, zwischenzeitliche Verminderung der Strömung z. B. durch die Blockade von Abflusswegen, um hydraulisch wirksame Drücke aufzubauen, und relative Ortsfestigkeit der ablaufenden, sich periodisch wiederholenden Vorgänge.

Es wird als wahrscheinlich unterstellt, dass es im Nachweiszeitraum erneut zu einer Kaltzeit vom Ausmaß der Elster-Kaltzeit und einer damit verbundenen Rinnenbildung mit einer durchschnittlichen Rinnentiefe von etwa 200 bis 300 m am Standort kommt. Größere Rinnentiefen sind weniger wahrscheinlich. Durch die hydromechanische Erosion am Rinnenboden ist eine Tieferlegung des dann vorhandenen Salzspiegels um etwa 50 m möglich. Eine Rinnenbildung kann alternativ auch im Verlauf einer späteren Kaltzeit vom Typ Elster angenommen werden. Allerdings wird unterstellt, dass diese spätere Rinnenbildung einen abweichenden Verlauf gegenüber dem der früheren hat. Mehrere Rinnenbildungen (mehr als zwei) an gleicher Stelle werden nicht betrachtet.

Die Ausprägung ist für alle drei Einlagerungsvarianten gleich.

### **2.5.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### **2.5.2 Beeinflussende FEP**

#### **2.5.2.1 Erosion**

Aufgrund kaltzeitlicher Prozesse während einer vollständigen Inlandvereisung findet Erosion statt, die das Ausmaß glazialer Rinnenbildungen steuert. Extreme Erosionstiefen bis etwa 600 m wurden in Lockergesteinen nachgewiesen. Diese extremen Tiefen müssen nach den Darstellungen in der Quartärbasiskarte /STA 01/ als weniger wahrscheinlich, die durchschnittlichen Tiefen von ca. 200 bis 300 m als wahrscheinlich eingestuft werden. Dagegen erreichten die Erosionsleistungen im Festgestein nur mehrere Zehner Meter. In Norddeutschland wurde lokal (Rüdersdorf, östlich von Berlin /SCJ 95/) eine Erosionstiefe von etwa 50 m festgestellt. Ähnliche Erosionsleistungen sind mit den Rinnenbildungen in Dänemark verbunden, wo Gesteine der Oberkreide erodiert wurden.

Für die Erosionstiefen ist das Wirken des FEP *Vollständige Inlandvereisung* relevant und als wesentliche Voraussetzung auslösend. Die übrigen auslösenden FEP bewirken eine flächenhafte Erosion, die zur Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung* keinen Beitrag liefert.

Von den die Erosion beeinflussenden FEP ist nur das FEP *Deck- und Nebengebirge* relevant, das über die Gesteinseigenschaften das Ausmaß des Erosionswirkens und damit die Rinnentiefe bestimmt.

**Tab. 2.8** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Erosion*

Auslösende FEP	Beeinflussende FEP
Transgression oder Regression	Deck- und Nebengebirge
Permafrost	Topografie
Inlandvereisung in randlicher Lage	Oberflächengewässer
Vollständige Inlandvereisung	

### 2.5.2.2 Vollständige Inlandvereisung

Eine vollständige Bedeckung des Standortgebietes mit einem mächtigen Inlandgletscher (bis zu 1.500 m) ist Voraussetzung für die Bildung von glazialen Rinnen. Damit ist nur das FEP *Globale klimatische Veränderungen* für die Relevanz des FEP *Vollständige Inlandvereisung* wichtig, da bei klimatischen Veränderungen mit extremer bzw. lang anhaltender Abkühlung die Eismächtigkeiten höher und die dadurch gesteuerten Auswirkungen auf die Tiefe von glazialen Rinnen deutlicher ausfallen werden.

Die beeinflussenden FEP *Topografie* und *Oberflächengewässer* sind für die Ausbildung von Eismächtigkeiten nicht relevant.

**Tab. 2.9** Beeinflussende FEP für das FEP *Vollständige Inlandvereisung*

Beeinflussende FEP	Topographie
Globale klimatische Veränderungen	Oberflächengewässer

### 2.5.2.3 Wirtsgestein

Die Härte des Salzgesteins beschränkt, verglichen mit der Härte der oberflächennahen, weichen und unkonsolidierten Tertiär- und Quartärsedimente, die im Zuge der Rinnenbildung mögliche Tiefenerosion. Rinnen über Salzstöcken erreichen geringere Tiefen als solche, die daneben in unkonsolidierten Lockermaterialien angelegt wurden. Von den das *Wirtsgestein* beeinflussenden FEP sind daher nur solche relevant, die die Materialeigenschaften des Wirtsgesteins verändern. Dazu werden die FEP *Störungen*

und Klüfte im Wirtsgestein und Bildung kryogener Klüfte gezählt. Das FEP *Glaziale Rinnenbildung* kann ebenfalls dazu gerechnet werden, wenn am Standort eine vorausgehende Rinnenbildung unterstellt wird.

Die übrigen beeinflussenden FEP laufen entweder in Endlagerteufe ab oder verursachen im Nachweiszeitraum keine signifikanten Materialveränderungen in den obersten Bereichen des Salzstocks.

**Tab. 2.10** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

#### 2.5.2.4 Deck- und Nebengebirge

Die weichen und unkonsolidierten Tertiär- und Quartärsedimente des Deck- und Nebengebirges ermöglichen eine im Zuge der Rinnenbildung ablaufende Tiefenerosion. Der Grad der Sedimentverfestigung ist beeinflussend für die Ausprägung der glazialen Rinnenbildung. Als Ursachen für eine Sedimentverfestigung sind prinzipiell *Diagenese*, *Permafrost*, *Vollständige Inlandvereisung*, *Auflösung und Ausfällung* und *Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge* zu benennen. Die *Diagenese* trägt in den oberflächennahen Sedimentschichten kaum zu einer Verfestigung bei. *Permafrost* wird unterhalb des Inlandeises abgebaut. Die Auswirkungen einer *Vollständigen Inlandvereisung* auf die Kompaktion von Sedimenten sind wegen der kurzen Verweilzeiten des Eises auf Lockersedimentabfolgen relativ gering. *Auflösungen und Ausfällungen* von Salzmineralien finden nur im Bereich des Salzspiegels statt. *Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge* setzen die Härte bzw. Festigkeit der Se-

dimentabfolgen lokal zusätzlich herab. Die genannten FEP besitzen nur eine geringfügige Relevanz, um auf die Ausprägung des FEP *Glaziale Rinnenbildung* über die Materialeigenschaften des *Deck- und Nebengebirges* einwirken zu können.

**Tab. 2.11** Beeinflussende FEP für das FEP *Deck- und Nebengebirge*

Beeinflussende FEP	Permafrost
Erosion	Inlandvereisung in randlicher Lage
Sedimentation	Vollständige Inlandvereisung
Diagenese	Glaziale Rinnenbildung
Diapirismus	Auflösung und Ausfällung
Transgression oder Regression	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

### 2.5.3 Nicht berücksichtigte FEP

Keine.

## 2.6 Versagen eines Brennelement-Behälters

Das FEP beschreibt den Verlust der Integrität eines Brennelement-Behälters in der Nachverschlussphase, der durch Produktionsfehler, betriebliche Störungen sowie durch mechanische oder chemische Einwirkungen verursacht wurde.

Das FEP wirkt auf die Initial-Barriere „Brennelement-Behälter“.

Unter der Ausprägung des FEP wird die quantitativ abgeschätzte Anzahl von möglichen Behältern mit Produktionsfehlern und die aus der Systementwicklung noch abzuleitende Anzahl der Behälter, die zukünftig versagen werden, verstanden.

Die durch die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ geforderte Integrität der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren wird durch die Behälterausslegung und Qualitätssicherungsmaßnahmen grundsätzlich gewährleistet. Bei der Variante C ist im Hinblick auf die Handhabbarkeit über diesen Zeitraum auch die mechanische Integrität der Bohrlochverrohrung erforderlich.

Das Risiko eines unerkannten Auftretens von Behältern mit Produktionsfehlern wird durch umfangreiche Prüfmaßnahmen bei der Behälterfertigung minimiert, ist aber nicht völlig auszuschließen. Entsprechende spezifische Untersuchungen wurden für POLLUX- und CASTOR-Behältern noch nicht durchgeführt /EBE 09/. Nach Untersuchungen von SKB /WOL 12/ ist zurzeit eine Fehler- / Nachweisquote von 0,1 % bei der Behälterfertigung der Stand von Wissenschaft und Technik und dient daher auch hier als eine Grundlage für eine Abschätzung der Anzahl der Behälter mit unerkannten Fertigungsfehlern mit Hilfe der Binomialverteilung.

### Abschätzung der Anzahl der Behälter mit unerkannten Fertigungsfehlern mit Hilfe der Binomialverteilung

Die für wahrscheinliche bzw. weniger wahrscheinliche Entwicklungen maximal zu unterstellende Anzahl der mit unentdeckten Fertigungsfehlern eingelagerten Behälter kann mittels der Binomialverteilung  $F(x) = Bn; p(x \leq k)$  ermittelt werden. Dabei sind

**p** – die Wahrscheinlichkeit für einen einzelnen Behälter, dass er mit einem unentdeckten Fertigungsfehler eingelagert wurde (hier  $10^{-3}$ ),

**n** – Anzahl der insgesamt eingelagerten Behälter

**k** – Funktionsvariable der Binomialverteilung für die Anzahl der mit einem unentdeckten Fertigungsfehler eingelagerten Behälter

**F(x)** – Verteilungsfunktion der Wahrscheinlichkeit, dass bis zu **x** Behälter mit einem unentdeckten Fertigungsfehler eingelagert wurden.

Demnach ist **1 - F(x)** die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als **x** Behälter mit einem unentdeckten Defekt eingelagert wurden.

Die zu unterstellende maximale Anzahl **x** der mit unentdeckten Fertigungsfehlern eingelagerten Behälter ergibt sich dann für wahrscheinliche Entwicklungen (Eintrittswahrscheinlichkeit > 10 % gemäß /BMU 10/) aus **1 - F(x) < 10<sup>-1</sup>**

bzw. für geringer wahrscheinliche Entwicklungen (Eintrittswahrscheinlichkeit > 1 % gemäß /BMU 10/) aus **1 - F(x) < 10<sup>-2</sup>**

Beispiel: n = 2120 POLLUX-Behälter, p = 0,001, x = max. Anzahl der Behälter mit unerkannten Fertigungsfehlern

	F (2.120, 0,001, x)	1 - F (2.120, 0,001, x)	
X ≤ 0	0,1199	0,8801	
X ≤ 1	0,3744	0,6256	
X ≤ 2	0,6442	0,3558	
X ≤ 3	0,8349	0,1651	
<b>X ≤ 4</b>	<b>0,9360</b>	<b>0,0640</b>	<b>wahrscheinlich (&lt; 10<sup>-1</sup>)</b>
X ≤ 5	0,9788	0,0212	
<b>X ≤ 6</b>	<b>0,9939</b>	<b>0,0061</b>	<b>weniger wahrscheinlich (&lt; 10<sup>-2</sup>)</b>
X ≤ 7	0,9984	0,0016	

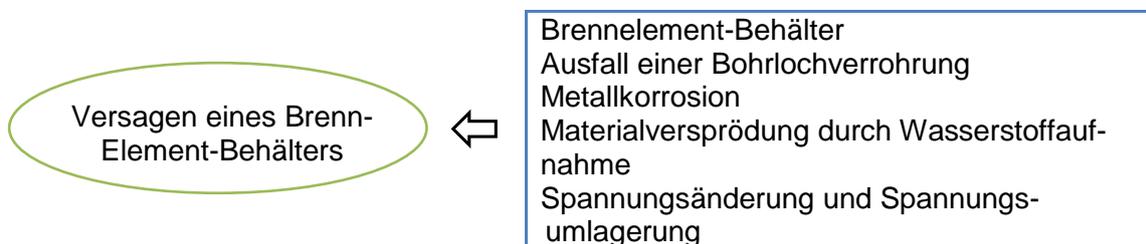
**Abb. 2.5** Abschätzung der Anzahl der Behälter mit unerkannten Fertigungsfehlern mit Hilfe der Binomialverteilung

Entsprechend dem oben dargestellten Vorgehen zur Abschätzung der Anzahl von Behältern mit unerkannten Fertigungsfehlern ergeben sich für die verschiedenen Varianten aufgrund der unterschiedlichen Anzahl einzulagernder Behälter folgende Zahlen:

Variante B1: Entsprechend der Behälterzahl von 2.120 POLLUX-10- und ca. 511 CASTOR-Behältern /BOL 12/ kann mit einer Wahrscheinlichkeit  $\geq 10\%$  die Einlagerung von bis zu 4 POLLUX-10-Behältern und eines defekten CASTOR-Behälters nicht ausgeschlossen werden.

Variante B2: Bei 1.097 CASTOR-Behälter mit Leistungsreaktor-BE und 511 CASTOR-Behälter mit Forschungsreaktor-BE /BOL 12/ können bis zu 2 CASTOR-Behälter mit Leistungsreaktor-BE und ein CASTOR-Behälter mit Forschungsreaktor-BE mit unerkannten Fertigungsfehlern eingelagert werden.

Variante C: Bei dieser Variante können aufgrund der größeren Anzahl an Behältern (7.068 BSK für Leistungsreaktor-BE und 290 BSK mit Forschungsreaktor-BE /BOL 12/) bis zu 11 BSK mit LR-BE und 1 BSK mit FR-BE mit unerkannten Fehlern eingelagert werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei einem Ausfall der Bohrlochverrohrungen auch die Funktion der Behälter beeinträchtigt werden kann.



**Abb. 2.6** Ausprägung des Versagens eines Brennelement-Behälters

Auf die Brennelement-Behälter wirken thermische und mechanische Lasten ein, die aus den wärmeentwickelnden Abfällen und den Spannungsverhältnissen im Gebirge resultieren. Diese Lasten werden aber durch die thermo-mechanische Auslegung der Behälter abgedeckt, so dass für die vorgesehene Funktionsdauer der Behälter kein Ausfall der Behälter aus diesen Gründen zu unterstellen ist.

Chemische Einwirkungen auf die Behälter (z. B. Metallkorrosion und Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme) werden durch die geringen verfügbaren Lösungsmengen in den Endlagerbereichen begrenzt. Durch die Behälterauslegung wird

sichergestellt, dass es während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht zu einem Behälterversagen durch Korrosion kommt.

Nach mehr als 500 Jahren ist aber ein Versagen der Brennelement-Behälter durch die genannten Einwirkungen nicht auszuschließen /MÜL 08/, /MÜL 09/. Die Ausprägung dieser Einwirkungen ist je nach Variante unterschiedlich, wobei die Varianten B1 und B2 bezüglich ihrer Nahfeldverhältnisse recht ähnlich sind. Die Einlagerung der Brennelement-Behälter in 300 m tiefe Bohrlöcher (Variante C) erfordert eine Bohrlochverrohrung und eine Sandverfüllung. Aus dieser Endlagerkonfiguration ergeben sich deutlich abweichende Temperatur- und Spannungsverhältnisse sowie – aufgrund der zusätzlichen Restfeuchte in der Sandverfüllung – auch ein anderer Ablauf der Metallkorrosion. Da die Verrohrung eine mechanische Schutzfunktion für den Behälter hat, könnte ein Ausfall der Verrohrung auch ein Behälterversagen nach sich ziehen.

Die obigen Ausführungen bzgl. des Versagens von Brennelement-Behältern gelten in gleicher Weise auch für die *Sonstigen Endlagerbehälter* mit Wiederaufarbeitungsabfällen. Die entsprechenden POLLUX, CASTOR und BSK sind weitgehend baugleich mit den Brennelement-Behältern /BOL 12/. Die Anforderung an die Bergbarkeit der Abfallgebände für die ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase /BMU 10/ besteht auch an die Behälter mit CSD-V. An alle anderen *Sonstigen Endlagerbehälter* bestehen keine langzeitsicherheitlichen Anforderungen.

### **2.6.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### **2.6.2 Beeinflussende FEP**

#### **2.6.2.1 Brennelement-Behälter**

Im FEP *Brennelement-Behälter* werden die Materialien und Eigenschaften der Endlagerbehälter beschrieben, die bestimmen, ob und unter welchen Randbedingungen es zu einem Versagen der Behälter kommen kann.

**Tab. 2.12** Beeinflussende FEP für das FEP Brennelement-Behälter

Beeinflussende FEP	Zersetzung von Organika
Konvergenz	Thermische Expansion und Kontraktion
Salzgruskompaktion	Radiolyse
Metallkorrosion*	Spannungsänderung und Spannungs-umlagerung*
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*	Versagen eines Brennelement-Behälters
Inventar: Metalle	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die *Salzgruskompaktion* geht mit *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* einher, die auf die Behälter einwirken. Die Auslegung der CASTOR- und POLLUX-Behälter deckt die mechanischen Lasten durch die Gebirgsspannungen ab.

Die Behälter sind gegen die *Thermische Expansion und Kontraktion* der Behältermaterialien und des Gebirges ausgelegt.

Variante B2: Die CASTOR und POLLUX-Behälter sind in gleicher Weise gegen mechanische und thermische Lasten ausgelegt. Weiterhin decken sie die Anforderungen von /BMU 10/ im Hinblick auf die Rückholbarkeit und Bergbarkeit der Behälter über 500 Jahre ab. Die beeinflussenden FEP und deren Ausprägung sind daher annähernd identisch. Da die CASTOR-Behälter eine größere Anzahl an Brennelementen enthalten, ist auch die Restfeuchte in den Behältern etwas höher /DÖR 12/.

Variante C: Die BSK besteht aus demselben Stahl wie der POLLUX-Behälter. Die Abschirmung (Polyethylen oder Grafit) beschränkt sich auf den Kopfbereich der Kokille. Die verschweißten Kokillen gewährleisten den Einschluss volatiler Radionuklide. Die Sicherstellung der mechanischen Integrität und der Bergbarkeit über den in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ geforderten Zeitraum von 500 Jahren ergibt sich durch die Kombination aus Bohrlochverrohrung und BSK /BOL 12/.

Die beeinflussenden FEP und deren Ausprägung sind annähernd identisch wie bei den anderen Brennelement-Behältern. Die Restfeuchte ist geringer als in den POLLUX und CASTOR-Behältern /DÖR 12/. Da die Kokillen nur teilweise abgeschirmt sind, ist von einer intensiveren *Radiolyse* der Versatzfeuchte (Sandverfüllung) auszugehen. Die

Gebirgsspannungen wirken nicht direkt auf den Behälter sondern auf die Bohrlochverrohrung.

Die FEP *Metallkorrosion*, *Materialversprödung* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* beeinflussen das FEP *Versagen eines Brennelementbehälters* bereits auf der ersten Ebene, daher werden sie hier nicht betrachtet. Die *Zersetzung von Organika* (Abschirmmaterialien: Polyethylen) der Brennelement-Behälter beeinflusst nicht signifikant die für ein Behälterversagen relevanten Behältereigenschaften.

### 2.6.2.2 Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Das FEP beschreibt den Verlust der mechanischen Stabilität einer Bohrlochverrohrung durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen bzw. eine Kombination verschiedener Einwirkungen. Außerdem wird der Ausfall durch unerkannte Fertigungsfehler berücksichtigt.

Die mechanische Auslegung der Verrohrung und die spätere Fertigung sollen zur Gewährleistung der Standsicherheit nach den Anforderungen des EUROCODE erfolgen (Fehlerquote 0,01 %). Die Abschätzung der Anzahl von Verrohrungsabschnitten mit möglicherweise unerkannten Fertigungsfehlern erfolgt wiederum mit der Binomialverteilung. Demnach können von den 33.150 einzubringenden Verrohrungsabschnitten möglicherweise sechs Verrohrungsabschnitte unerkannte Fertigungsfehler aufweisen, die zu einem frühzeitigen Ausfall führen können.

Der Ausfall von Verrohrungsabschnitten durch mechanische Deformation oder Bruch kann zum Versagen der Behälter im Inneren führen.

**Tab. 2.13** Beeinflussende FEP für das FEP *Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Metallkorrosion*
Diapirismus	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*
Bohrlochverrohrung	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Konvergenz	Fluiddruck

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B1 und B2: Dieses FEP ist für die Varianten B1 und B2 nicht zu betrachten.

Variante C: Durch laterale Salzbewegungen (*Diapirismus*) kann es zu Verspannungen, Deformationen und Brüchen der Bohrlochverrohrungen kommen.

Falls der Gebirgsdruck (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Konvergenz*) oder der *Fluiddruck* (von innen und außen) den bei der Auslegung unterstellten Druck überschreitet, kann es zur Beschädigung der Bohrlochverrohrungen und der Behälter kommen.

Ein Ausfall der Bohrlochverrohrung durch *Metallkorrosion* oder *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* führt nicht unmittelbar zum Versagen der Behälter.

### 2.6.2.3 Metallkorrosion

Im Referenzszenarium setzen sich die Lösungsmengen in den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle aus der geringen Restfeuchte in den Endlagerbehältern, der Versatzfeuchte (trockener Salzgrusversatz in den Einlagerungsfeldern: 0,012 – 0,017 Gew.-%, feuchter Salzgrusversatz in den Richtstrecken 0,6 Gew.-%, getrennt durch Dichtpfropfen), der Gebirgsfeuchte (Hauptsalz 0,012 – 0,017 Gew.-%) sowie Wasserbildung durch thermochemische / mikrobielle Sulfatreduktion zusammen. Lösungszutritte aus dem z3 können aufgrund der Streckenverschlüsse nicht in Einlagerungsbereiche vordringen.

Varianten B1 und B2: Entsprechend den oben dargestellten geringen Lösungsmengen wird es zwar zur Oberflächenkorrosion, aber nicht zu einem Versagen der dickwandigen Behälter (Wandstärke POLLUX: 43,5 cm, CASTOR: 37 – 45 cm) durch Flächenkorrosion kommen /MÜL 09/. Bei einer möglichen Lochfraß-Korrosion – speziell an den Schweißnähten der Deckel – ist ein Versagen nicht auszuschließen.

Variante C: Die BSK hat nur eine geringe Wandstärke von 19,5 mm (unten) bzw. 44,5 mm (oben). Bei den geringen Feuchtemengen im Nahfeld (0,2 % in der Sandverfüllung des Einlagerungsbohrlochs) kommt es innerhalb von 500 Jahren nicht zum Versagen der Behälter durch Flächenkorrosion. Langfristig und nach dem Ausfall der Bohrlochverrohrung ist beim Zutritt von Lösungen aus dem Gebirge ein Versagen der Behälter durch Metallkorrosion nicht auszuschließen. Gleiches gilt auch für die Betrachtung einer möglichen Lochfraß-Korrosion.

**Tab. 2.14** Beeinflussende FEP für das FEP *Metallkorrosion*

Beeinflussende FEP	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Metalle	Bohrlochverrohrung
Abfallmatrix	Lösungen im Grubenbau
Brennelement-Behälter*	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Sonstige Endlagerbehälter	Auflösung und Ausfällung
Versagen eines Brennelement-Behälters	Wärmeproduktion
Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters	Diffusion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B1 und B2: Während metallische Materialien (in Form von Behältern und technischen Einrichtungen) in großer Menge im Endlager vorhanden sind /DÖR 12/ und das saline Milieu (inkl. Sulfid-Bildung durch *Thermochemische Sulfatreduktion*) sowie die Temperatur (*Wärmeproduktion* durch die wärmeentwickelnden Abfälle) die Korrosion fördern, begrenzen die geringen Lösungsmengen in den östlichen Einlagebereichen (*Lösungen im Grubenbau*) die Intensität der Korrosion. Außerdem können Krustenbildungen, die auf *Auflösung und Ausfällung* zurückzuführen sind, ebenfalls den Korrosionsfortschritt hemmen.

Variante C: Unterschiede zur Variante B1 ergeben sich durch die Bohrlochverrohrung, die Versatzfeuchte in der Sandverfüllung (*Lösungen im Grubenbau*), das *Geochemische Milieu im Grubenbau* (Sandverfüllung, andere Behälter) sowie eines veränderten Temperaturfeldes gemäß dem Endlagerkonzept (*Wärmeproduktion*).

FEP, die keine Initial-Barrieren betreffen (*Abfallmatrix, Sonstige Endlagerbehälter, Technische Einrichtungen*), oder bereits auf der 1. Ebene diskutiert wurden (*Brennelement-Behälter*), sind hier nicht zu betrachten. Die hier relevanten Aspekte des *Inventar: Metalle* werden durch das FEP *Brennelementbehälter* abgedeckt.

#### 2.6.2.4 Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Die Baumaterialien der Behälter können prinzipiell von einer *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* betroffen sein. Durch *Metallkorrosion* wird Wasserstoff freigesetzt. Da es aber entsprechend der geringen Lösungsmengen nur zu einer be-

begrenzten Metallkorrosion kommen wird (s. o.), wird auch die Intensität der *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* begrenzt sein. Inwieweit die Materialversprödung zu einer Beeinträchtigung der Behältereigenschaften führen kann, ist noch durch Modellrechnungen zu prüfen.

**Tab. 2.15** Beeinflussende FEP für das FEP *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Inventar: Metalle	Gasmengen im Grubenbau
Bohrlochverrohrung	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Brennelement-Behälter*	Sonstige Endlagerbehälter

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B1 und B2: Neben der Verfügbarkeit von Metallen und einem adäquaten geochemischen Milieu wird das Auftreten von *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* vor allem durch die Menge und den Partialdruck des vorhandenen Wasserstoffs bestimmt. Der wesentliche Wasserstoff-bildende Prozess in einem Endlager ist die Metallkorrosion. Die *Radiolyse* von Feuchtigkeit außerhalb der Behälter spielt in den Varianten B1 und B2 aufgrund der Abschirmung der Behälter keine Rolle. Da aufgrund der geringen verfügbaren Lösungsmengen (s. o.) nur im begrenzten Umfang Korrosion und Wasserstoff-Bildung stattfinden werden, wird auch die Intensität der *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* gering sein.

Variante C: Alle beeinflussenden FEP des FEP *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* sind anders ausgeprägt als in den Varianten B1 / B2, so z. B. die Art und Menge der Metalle, die Art der Behälter und die Bohrlochverrohrung. Weitere Differenzen bestehen bezüglich des geochemischen Milieus und – aufgrund der abweichenden Metallkorrosion – bezüglich der Gasmengen im Grubenbau.

### 2.6.2.5 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Varianten B1 und B2: Die CASTOR und POLLUX-Behälter werden entsprechend den BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ für eine Handhabbarkeit über 500 Jahren auch gegen thermo-mechanische Spannungen durch die wärmeentwickelnden Abfälle (*Thermische Expansion oder Kontraktion*) und die Spannungen durch den Gebirgsdruck, die durch die *Konvergenz* übertragen werden, ausgelegt. Zudem reduzieren die

überwiegend kompressiven Spannungen im Wirtsgestein die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Behälter durch diese Spannungen.

Zu späten Zeiten (nach mehr als 500 Jahren) kann die mechanische Stabilität der Behälter durch *Metallkorrosion* oder *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* reduziert sein. Dann ist ein mechanisches Versagen der Behälter nicht ausgeschlossen.

Variante C: Die BSK ist entsprechend der Anforderung des Einschlusses der radioaktiven Stoffe ausgelegt /BOL 12/. Im Endlagerbetrieb wird sie zum Strahlenschutz und zum Schutz bei Störfällen in einer Transportabschirmung gehandhabt. Die mechanische Stabilität im Bohrloch und die Erfüllung der BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ bezüglich Rückholbarkeit und Handhabbarkeit über 500 Jahre wird durch die Bohrlochverrohrung gewährleistet. Zu späten Zeiten (nach mehr als 500 Jahren) kann die mechanische Stabilität der Verrohrung durch *Metallkorrosion* oder *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* reduziert sein. Dann ist auch ein *Versagen eines Brennelement-Behälters* nicht ausgeschlossen.

**Tab. 2.16** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Verschlussmaterial
Erdbeben	Schachtverschlüsse
Sedimentation	Streckenverschlüsse
Diapirismus	Sonstige Verschlussbauwerke
Transgression oder Regression	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Inlandvereisung in randlicher Lage	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Ausfall eines Dichtpfropfens
Glaziale Rinnenbildung	Konvergenz
Thermische Expansion oder Kontraktion	Fluiddruck
<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Brennelement-Behälter*	Salzgruskompaktion
Sonstige Endlagerbehälter	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Versatz	Quellen des Bentonits
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Deck- und Nebengebirge
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Nur ein kleiner Teil der auslösenden und beeinflussenden FEP des FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* ist relevant im Hinblick auf das *Versagen eines Brennelement-Behälters*. Die Spannungsverhältnisse im Salzgebirge der Einlagerungsbereiche hängen von den Eigenschaften und Mächtigkeiten des Deck- und Nebengebirges sowie des Wirtsgesteins ab. Großräumige Spannungsänderungen sind durch Änderungen der Auflasten, möglicherweise im Fall einer *Transgression oder Regression*, zu erwarten. Nur bei einem frühen Eintritt (mit Resthohlräumen im Grubengebäude) von Ereignissen mit entsprechendem Potenzial können sich Auswirkungen auf die Spannungsverhältnisse ergeben, die für ein *Versagen eines Brennelement-Behälters* relevant sind. Die Kaltzeit-FEP treten erst zu einem Zeitpunkt auf, wenn die Resthohlräume im Grubengebäude geschlossen sind.

Zu frühen Zeiten werden die Spannungsverhältnisse im Nahfeld durch die Eigenschaften der Behälter und des Versatzes, die *Salzgruskompaktion* und die Volumenzunahme durch *Thermochemische Sulfatreduktion* sowie durch den *Fluiddruck* beeinflusst.

Variante B2: Die FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion*, *Versatz* (geringere Versatzmenge), *Konvergenz*, *Fluiddruck*, *Salzgruskompaktion*, *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung* durch *Thermochemische Sulfatreduktion* werden eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Eine Konkretisierung der veränderten Ausprägung wird erst durch weitere Erkenntnisse aus Prozessanalysen möglich sein (vgl. auch Kapitel 1, Fußnote 1). Derartige veränderliche Ausprägungen ohne weitere Konkretisierung sind an einigen Stellen im folgenden Text dokumentiert.

Variante C: Von den auslösenden FEP wird nur das FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion* aufgrund des anderen Endlagerkonzeptes eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Die thermischen Einflüsse haben Auswirkungen auf viele Prozess-FEP (*Konvergenz*, *Fluiddruck*, *Thermochemische Sulfatreduktion* (Beeinflussung anderer Gebirgsbereiche)). Die Versatzmengen sind geringer als in der Variante B1 (384.000 m<sup>3</sup> trockener Salzgrus, 123.000 m<sup>3</sup> feuchter Salzgrus). Außerdem ist die Sandverfüllung der Einlagerungsbohrlöcher mit Restfeuchte im Sand von 0,2 Gew.-% und der Setzung der Sandverfüllung zu berücksichtigen. Da die *Salzgruskompaktion* durch die *Konvergenz* und den *Fluiddruck* beeinflusst wird, wird sie ebenfalls anders ausgeprägt sein als in der Variante B1.

### 2.6.3 Nicht berücksichtigte FEP

Keine.

## 2.7 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen beschreibt die Beeinflussung der mineralischen Baustoffe der Barrieren durch veränderte (geo-)chemische Umgebungsbedingungen über die Zeit. Sie schließt Auflösung und Ausfällung sowie Korrosionsprozesse ein.

Das FEP beeinträchtigt die Funktion der Initial-Barrieren „Schachtverschluss“ und „Streckenverschluss“.

Unter der Ausprägung des FEP wird die Intensität der Umwandlung der Barrierenbaustoffe und der Einschränkungen der Barrierenfunktion verstanden. Diese Werte ergeben sich aus der Systementwicklung und können daher hier nur qualitativ abgeschätzt werden.

Die Eigenschaften des *Verschlussmaterials* und konstruktive Eigenschaften der *Schachtverschlüsse* und *Streckenverschlüsse* bestimmen die Beständigkeit der Barrieren bei *Lösungszutritt* und einem variierenden *Geochemischen Milieu im Grubenbau*. Die Verschlüsse wurden für ihre vorgesehene Funktionsdauer von 50.000 Jahren entsprechend der heute beobachteten Bandbreite der Deckgebirgs- und Wirtsgesteinslösungen ausgelegt /LIN 12/. Diese Bandbreite deckt alle denkbaren Änderungen der hydrochemischen Verhältnisse bis zur nächsten Kaltzeit ab. Dementsprechend werden in den Streckenverschlüssen und den unteren Schachtbereichen Sorelbeton, im mittleren Schachtbereich Salzbeton und im oberen Schachtbereich Bentonit für die Dichtelemente verwendet /ENG 11/, /MÜL 12a/. Für die oberen Schachtbereiche wurden bei der Auslegung zwei Lösungstypen (Süßwasser bis schwach salinar sowie Hutgesteinslösungen, hoch salinar) und mögliche alterierte Lösungen (z. B. durch Betonkorrosionsprodukte) berücksichtigt /LIN 12/. Daher ist während der vorgesehenen Funktionsdauer nur eine geringe Alteration der Barrieren anzunehmen. Während zukünftiger Kaltzeiten kann es zu geänderten hydrochemischen Verhältnissen im Deckgebirge kommen, die zu einer Alteration der Schachtverschlüsse führen. Die Entwicklung der hydrochemischen Verhältnisse während der zukünftigen Kaltzeiten ist aber nicht prognostizierbar.

Durch die Auswahl und Diversifikation der Verschlussmaterialien und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei ihrer Herstellung und dem Einbau wird eine Alteration der Verschlussmaterialien begrenzt und verzögert.

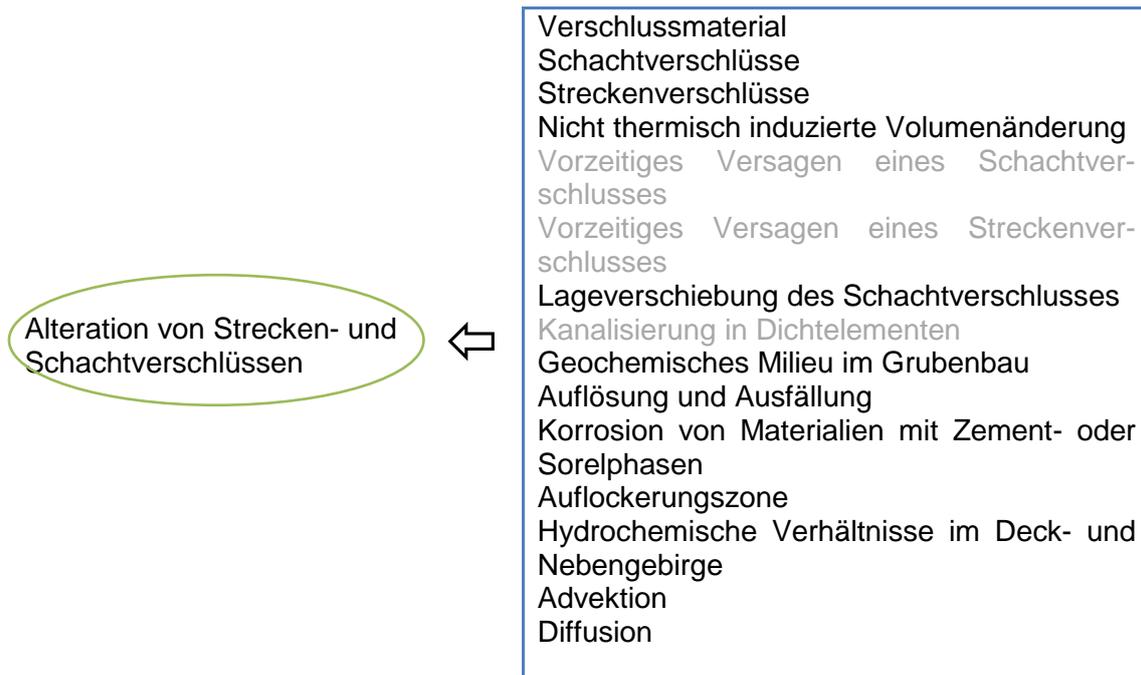
Da Wechselwirkungen zwischen Lösungen und Baustoffen die Voraussetzung für das Auftreten von Alterationen darstellen, sind Lösungen im Grubenbau, das geochemische Milieu und die Temperatur wichtige Randbedingungen für das Auftreten und die Ausprägung der Alterationen. Im Referenzszenarium sind für die Einlagerungsbereiche mit ausgedienten BE und HAW nur geringe Lösungsmengen zu unterstellen, die aus der Versatzfeuchte (0,6 Gew.-% feuchter Salzgrus, < 0,02 Gew.-% trockener Salzgrus) und der Gebirgsfeuchte (Hauptsalz 0,012 – 0,017 Gew.-%) bestehen /WOL 12/. Größere Wassermengen befinden sich in den Einlagerungsbereichen mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen (ca. 6.772 t, /PEI 11/). Die Lösungsvolumina eines Reservoirs im Leine-Salz von max. 5.100 m<sup>3</sup> sowie die zunächst geringen und zu späten Zeiten aufgrund einer Alteration auch stärkeren Lösungszutritte über die Schächte können aufgrund der Speicherräume in den Infrastrukturbereichen auf der 840 und 870 m-Sohle und den Streckenverschlüssen nicht in die Einlagerungsbereiche vordringen.

Die Verschlüsse sind gegen thermische (Aufheizung durch wärmeentwickelnde Abfälle), mechanische (Quellen von Baustoffen, Gebirgsspannung) und hydraulische (Fluiddruck) Lasten ausgelegt. Trotzdem können Prozesse, wie die *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* durch *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges (aufgrund der eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle) und *Salzaufstieg (Diapirismus)* oder Rissbildung durch tiefreichende Abkühlung bzw. Erosion durch glaziale Rinnen, die Integrität der Verschlüsse beeinträchtigen und damit einer Alteration Vorschub leisten.

Im Bereich der Barrieren ist der diffusive Stofftransport wichtig, da er zur Durchmischung von Lösungen führt und so das Ausmaß der Zementkorrosion bestimmt.

Die *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* wird im Referenzszenarium während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht zu einem Versagen führen.

Strecken- und Schachtverschlüsse sind in allen (Endlager-) Varianten identisch. Wesentliche Abweichungen bezüglich des geochemischen Milieus sind im Fernfeld für die verschiedenen Varianten nicht zu erwarten. Da alle chemischen Reaktionen temperaturabhängig sind, kann sich aber die unterschiedliche Temperaturverteilung auf die Alteration auswirken. Außerdem ist zu prüfen, ob durch die abweichenden Spannungsverhältnisse im Gebirge Wegsamkeiten in der Auflockerungszone entstehen können, die eine Alteration begünstigen.



**Abb. 2.7** Ausprägung der *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*

### 2.7.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.7.2 Beeinflussende FEP

Die chemische Stabilität der Verschlüsse wird durch die Eigenschaften der Verschlussmaterialien und konstruktive Eigenschaften der Schacht- und Streckenverschlüsse bestimmt. Die entsprechenden Spezifikationen sind im Endlagerkonzept festgelegt und bilden die Grundlage für den Integritätsnachweis für die geotechnischen Barrieren. Die Schacht- und Streckenverschlüsse haben in allen Varianten dasselbe Design.

#### 2.7.2.1 Verschlussmaterial

Variante B1: Die *Konvergenz* führt zur Einspannung der Barrieren und beeinflusst so auch deren hydraulische Eigenschaften, die für eine mögliche Alteration von Bedeutung sind.

Die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* und das *Quellen des Bentonits* zählen zu den materialspezifischen Eigenschaften der Verschlussmaterialien. Diese beeinflussen die hydraulischen Eigenschaften und somit auch eine mögliche Alteration.

**Tab. 2.17** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Auflösung und Ausfällung*
Konvergenz	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Quellen des Bentonits	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Kanalisation in Dichtelementen	Glaziale Rinnenbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie resultierende *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* in den Barrieren und im angrenzenden Gebirge verändern die hydraulischen Eigenschaften der Barrieren und beeinflussen so die Alteration.

Durch kaltzeitliche Entwicklungen (*Glaziale Rinnenbildung*) können die oberen Schachtverschlusselemente beeinträchtigt werden. Dies kann der Alteration der Baumaterialien im Schachtverschluss Vorschub leisten.

Variante B2: Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration werden die FEP *Konvergenz, Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration werden die FEP *Konvergenz, Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.7.2.2 Schachtverschlüsse

Variante B1: Das standortspezifische Bemessungserdbeben wird bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt /MÜL 12a/. Gleichwohl kann es zu Setzungen der Schottersäule und zu Rissbildungen im Beton kommen, die die Alteration begünstigen.

Auch Salzbewegungen durch *Diapirismus* können zu Lageverschiebungen und Rissbildungen an den Schachtverschlüssen führen. Dies kann die Alteration der Verschlüsse beeinflussen. Durch kaltzeitliche Entwicklungen (*Subrosion, Glaziale Rinnenbildung*) können die oberen Schachtverschlüsselemente in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Dies kann einer verstärkten Alteration der Baumaterialien im Schachtverschluss Vor-schub leisten.

**Tab. 2.18** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Diapirismus	Lageverschiebung eines Schachtverschlusses*
Subrosion	Kanalisation in Dichtelementen
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen	Auflockerungszone
Konvergenz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die *Konvergenz*, die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges, *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* sowie der *Fluiddruck* stellen mechanische bzw. hydraulische Lasten dar, die bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt wurden /MÜL 12a/. Falls sich durch diese Prozesse die hydraulischen Eigenschaften der Barrieren verändern, so wird auch die Alteration beeinflusst.

Die hydraulischen Eigenschaften der Barrieren werden außerdem durch die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen der Materialien* und das *Quellen des Bentonits* beeinflusst.

Die *Auflockerungszone* wirkt sich wesentlich auf die hydraulischen Eigenschaften des Schachtverschlusses aus. Für das Referenzszenarium wird unterstellt, dass sie sich in der vorgesehenen Weise schließt.

Varianten B2 und C: Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration werden die FEP *Konvergenz, Fluiddruck, Thermische Expansion oder Kontraktion, Auflockerungszone* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Das *Vorzeitige Versagen des Schachtverschlusses* sowie die *Kanalisation in Dichtelementen* sind weniger wahrscheinliche Entwicklungen und müssen daher hier nicht betrachtet werden (vgl. Anhang B). In ähnlicher Weise sind die Kaltzeit-FEP nicht relevant, da sie erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auftreten.

### 2.7.2.3 Streckenverschlüsse

**Tab. 2.19** Beeinflussende FEP für das FEP *Streckenverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Diapirismus	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen	Auflockerungszone
Konvergenz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Alle Varianten: Die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung sind – abgesehen von den schachtspezifischen FEP (*Subrosion, Glaziale Rinnenbildung, Lageverschiebung eines Schachtverschlusses, Quellen des Bentonits*) – identisch mit dem FEP *Schachtverschlüsse* (s. o.).

#### 2.7.2.4 Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Bei einer Lageschiebung des Schachtverschlusses kann es zu Rissbildungen in den Betonelementen kommen, die die Alteration der Barrieren begünstigen.

Variante B1: Falls es infolge von Lageverschiebungen des Schachtverschlusses zu einer Änderung der hydraulischen Eigenschaften der Barriere kommt, so kann dies Auswirkungen auf eine mögliche Alteration der Barriere haben.

Auslösende Prozesse sind die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges sowie der *Diapirismus*, die jeweils zu Lageverschiebungen von wenigen Metern und eventuell zu Rissbildungen in den Betonelementen führen können. Setzungen der Schottersäule infolge eines Erdbebens führen aufgrund entsprechender Betonwiderlager nicht mehr zu Lageverschiebungen der Dichtelemente.

Die Einspannung der Barrieren durch *Konvergenz* und durch ein Quellen der Baustoffe (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Quellen des Bentonits*) führen zu einer Verringerung der hydraulischen Durchlässigkeit.

Variante B2: Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration werden die FEP *Konvergenz, Fluiddruck, Nicht thermisch induzierte Volumenänderung* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Aufgrund des abweichenden Temperaturfeldes durch die Bohrlochlagerung wird die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges anders ausgeprägt sein als bei der Variante B1. Weiterhin werden aufgrund der anderen Endlagerkonfiguration die FEP *Konvergenz, Fluiddruck, Nicht thermisch induzierte Volumenänderung* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* eine andere Ausprägung als in der

Variante B1 haben. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.20** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*

<b>Auslösende FEP</b>	Konvergenz
Diapirismus	Fluiddruck
Thermische Expansion oder Kontraktion	Sonstige Verschlussbauwerke
<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Verschlussmaterial*	Quellen des Bentonits
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.7.2.5 Geochemisches Milieu im Grubenbau

Voraussetzung für die Ausbildung eines geochemischen Milieus ist die Verfügbarkeit von *Lösungen im Grubenbau*. Für die *Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse* sind die Versatzfeuchte (0,6 Gew.-% im feuchten Salzgrus), Lösungszutritte aus dem Wirtsgestein in den angrenzenden Infrastrukturbereich (max. 5.100 m<sup>3</sup>) sowie Lösungszutritte aus dem Deckgebirge über den Schacht relevant. Zudem enthalten die Endlagergebände für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle größere Lösungsmengen (ca. 6.772 t /PEI 11/).

Das *Geochemische Milieu im Grubenbau* ist eine wichtige Randbedingung für die Alteration der Barrieren. Entsprechend dem aufgeschlossenen Wirtsgestein wird es sich bei den Lösungen im Grubengebäude in der Regel um gesättigte Laugen handeln. Im Nahbereich wird der Chemismus durch die eingelagerten Abfallgebände, d. h. durch die Festphasen, Lösungen und Gase (Inventar-FEP), beeinflusst. Weiterhin sind Prozesse relevant, die diese Stoffe beeinflussen bzw. neue Stoffverbindungen bilden wie *Auflösung und Ausfällung*, verschiedene Korrosionsprozesse und *Zersetzung von Organika*. Unterschiede bezüglich des geochemischen Milieus werden aufgrund unterschiedlicher

Behälter, Inventare, technischer Einrichtungen (Gleitschienen in der Variante B2) und Verfüllmaterialien (Sand in den Einlagerungsbohrlöchern in der Variante C, Verfüllung des Behälterschachtes mit Magnetit oder abgereichertem  $U_3O_8$  in Variante B2 /CHE 11/) nur im Nahfeld auftreten. Diese Abweichungen werden sich aber nicht signifikant auf die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse auswirken und werden daher hier nicht betrachtet.

**Tab. 2.21** Beeinflussende FEP für das FEP *Geochemisches Milieu im Grubenbau*

Beeinflussende FEP	
Lösungen im Grubenbau	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Gasmenge im Grubenbau	Zersetzung von Organika
Inventar: Metalle	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Inventar: Organika	Wärmeproduktion
Inventar: Sonstige Stoffe	Diffusion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Advektion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Metallkorrosion	Thermochemische Sulfatreduktion
Korrosion der Brennstoffmatrix	Komplexbildung
Korrosion von Glas	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Da die meisten der oben genannten geochemischen Reaktionen temperaturabhängig sind, wird sich die unterschiedliche Temperaturentwicklung in den verschiedenen Varianten in begrenztem Umfang auch im Fernfeld auf das geochemische Milieu auswirken. Da je nach Variante verschiedene Gebirgsbereiche von der Aufheizung betroffen sind, wird auch die *Thermochemische Sulfatreduktion* je nach Variante unterschiedlich ausgebildet sein.

Die FEP *Inventar: Organika*, *Inventar: Sonstige Stoffe*, *Komplexbildung* und *Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails* sind in erster Linie für das geochemische Milieu im Nahfeld der Variante A relevant /PEI 11/.

### 2.7.2.6 Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge beeinflussen die Alteration der oberen Teile der Schachtverschlüsse /LIN 12/.

Bei der Auswahl der Verschlussmaterialien und der Auslegung der Barrieren wurde die aktuelle Bandbreite des Chemismus der Deckgebirgslösungen zugrunde gelegt. Sie reicht von oberflächennahem Süßwasser (bis schwach salinar) bis zu Hutgesteinslösungen (hoch salinar) /LIN 12/, /MÜL 12a/.

**Tab. 2.22** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge*

<b>Auslösende FEP</b>	<i>Auflösung und Ausfällung*</i>
Deck- und Nebengebirge	Inlandvereisung in randlicher Lage
<b>Beeinflussende FEP</b>	Vollständige Inlandvereisung
Erosion	Glaziale Rinnenbildung
Sedimentation	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
Diagenese	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
Subrosion	Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge
Permafrost	Oberflächengewässer
Transgression oder Regression	Komplexbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Für alle Varianten: Die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges, klimatische Entwicklungen, die durch Veränderungen des Schichtenaufbaus ausgelösten Veränderungen der *Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge*, die Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen (*Erosion, Subrosion, Auflösung und Ausfällung*) sowie *Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge* beeinflussen die hydrochemischen Verhältnisse. Es wird erwartet, dass sich die aktuellen hydrochemischen Verhältnisse bis zur nächsten Kaltzeit nicht wesentlich ändern werden. Die weitere hydrochemische Entwicklung ist nicht prognostizierbar. Ein geänderter Chemismus und eine verstärkte Alteration der Verschlüsse sind dann nicht auszuschließen.

### 2.7.2.7 Auflösung und Ausfällung

*Auflösung und Ausfällung* bzw. Korrosion sind wesentliche Alterationsprozesse. Da für das Referenzszenarium unterstellt wird, dass die aktuelle Bandbreite der Deckgebirgslösungen alle denkbaren hydrogeologischen Entwicklungen bis zur nächsten Kaltzeit abdeckt, werden in dieser Zeit aufgrund der entsprechenden Auslegung der Barrieren nur in begrenztem Umfang *Auflösung und Ausfällung* bzw. Korrosionsprozesse an den Baustoffen stattfinden. Für spätere Zeiten mit geänderten Chemismus sind vor allem im Schachtbereich verstärkte Alterationsprozesse nicht auszuschließen.

Variante B1: Bei Anwesenheit von Lösungen finden permanent Auflösungs- und Ausfällungsprozesse statt. Während im Referenzszenarium in den Einlagerungsbereichen nur geringe Lösungsmengen zu unterstellen sind, stehen am oberen Schachtverschluss unmittelbar Deckgebirgslösungen an.

Die vorhandenen Feststoffe bestimmen mögliche Auflösungsprozesse. Im Hinblick auf die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse sind vor allem die Verschlussmaterialien relevant.

Das *Geochemische Milieu in den Grubenbauen* sowie im Deck- und Nebengebirge, die *Wärmeproduktion* durch die Abfälle sowie die *Komplexbildung* sind wichtige Randbedingungen für Auflösungs- und Ausfällungsprozesse. Außerdem beeinflussen die Druckverhältnisse, die durch die Gebirgsspannungen erzeugt werden, die Löslichkeit von Salz.

Variante B2: Abweichungen zur Variante B1 ergeben sich durch die unterschiedlichen Lösungsmengen, die mit dem Versatz eingebracht werden. Weitere Abweichungen ergeben sich durch das abweichende Temperaturfeld (andere Endlagerkonfiguration) und die resultierenden Gebirgsspannungen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung weitgehend der Variante B1.

Variante C: Abweichungen zur Variante B1 ergeben sich durch die unterschiedlichen Lösungsmengen, die mit dem Versatz eingebracht werden. Weitere Unterschiede ergeben sich durch das abweichende Temperaturfeld (andere Endlagerkonfiguration) und die resultierenden Gebirgsspannungen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung weitgehend der Variante B1.

**Tab. 2.23** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Auflösung und Ausfällung*

<b>Auslösende FEP</b>	
Lösungen im Grubenbau	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Verschlussmaterial*
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Versatz
Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge	Inventar: Sonstige Stoffe
Wirtsgestein	Verdampfen von Wasser
Komplexbildung	Wärmeproduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.7.2.8 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

**Tab. 2.24** Beeinflussende FEP für das FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	Lösungen im Grubenbau
Inventar: Sonstige Stoffe	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Abfallmatrix	Auflösung und Ausfällung*
Sonstige Endlagerbehälter	Wärmeproduktion
Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters	Radiolyse
Verschlussmaterial*	Diffusion
Sonstige Verschlussbauwerke	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die *Korrosion der Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* hängt vom Vorhandensein von Lösungen ab und trägt – zusammen mit den Prozessen *Auflösung und Ausfällung* – unmittelbar zur *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* bei. Wie bei allen anderen Alterationsprozessen sind das *Geochemische Milieu* und die *Wärmeproduktion* wichtige Randbedingungen für die Korrosionsprozesse.

Die Stoffdiffusion im Porenraum ist ein wesentlicher Transportprozess in zementhaltigen Materialien. Sie kann z. B. zur Durchmischung von Lösungen führen und so das Ausmaß der Zementkorrosion bestimmen.

Varianten B2 und C: Abweichungen zur Variante B1 ergeben sich bezüglich der *Lösungen im Grubenbau* (durch andere Versatzmengen andere Restfeuchtemengen im Versatz (feuchter Salzgrus, Sandverfüllung)) und der *Wärmeproduktion* (durch andere Endlagerkonfiguration anderes Temperaturfeld). Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung weitgehend der Variante B1.

### **2.7.2.9 Auflockerungszone**

Solange die Auflockerungszone im Bereich der Verschlüsse eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit aufweist, kann sie einer Alteration der Barriere Vorschub leisten.

Der Stofftransport durch die Barriere erfolgt über Diffusion. Da für das Referenzszenarium unterstellt wird, dass sich die Auflockerungszone in der vorgesehenen Weise schließt, werden auch für den Stofftransport am Kontakt Barriere – Gebirge diffusive Prozesse unterstellt. Ein advektiver Stofftransport ist weniger wahrscheinlich. Diese Stofftransportprozesse können auch zur Alteration der Barrieren beitragen.

Da die Ausbildung der Auflockerungszone wesentlich von der Geometrie der Grubenräume bestimmt wird, sind Unterschiede zwischen den Varianten vor allem im Nahfeld zu erwarten. Dies ist aber für die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse nicht relevant. Bezüglich der Ausbildung der Auflockerungszone im Fernfeld sind abweichende Spannungsverhältnisse im Gebirge aufgrund des abweichenden Temperaturfeldes von Bedeutung. Inwieweit sich diese Unterschiede auf die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse auswirken, ist zu prüfen.

**Tab. 2.25** Beeinflussende FEP für das FEP *Auflockerungszone*

Beeinflussende FEP	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Inventar: Sonstige Stoffe	Konvergenz
Verschlussmaterial*	Salzgruskompaktion
Schachtverschlüsse*	Quellen des Bentonits
Streckenverschlüsse*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Wirtsgestein
Sonstige Verschlussbauwerke	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Bohrlochverrohrung	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Eigenschaften der Auflockerungszone (ALZ), die sich im Konturbereich der Grubenräume durch Spannungsänderungen im Gebirge bildet, sind entscheidend für die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse. Die Barrierendichtheit wird durch die integrale Permeabilität beschrieben, die sich aus den Permeabilitäten der Barriere, der Kontaktfläche zum Gebirge und der ALZ ergibt.

Die Ausbildung der ALZ wird durch die Steifigkeit der Verschlussmaterialien und durch den Konturnachschnitt an den Barrierenstandorten beeinflusst. Durch die *Konvergenz* läuft das Gebirge auf die Barriere auf und die ALZ wird sich durch den Stützdruck der Barriere schließen. Dieser Prozess kann bei einem Quellen von Baustoffen (z. B. *Quellen von Bentonit*) beschleunigt werden.

In den mit Salzgrus-verfüllten Bereichen entsteht durch die *Salzgruskompaktion* ein Stützdruck, der zum Verschließen der ALZ führt.

Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges führt – in Abhängigkeit von den visko-elasto-plastischen Eigenschaften des Wirtsgesteins – zu *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen*, die ihrerseits die Ausbildung der ALZ beeinflussen.

Varianten B2 und C: Mögliche Abweichungen bezüglich der Ausprägung der Auflockerungszone können sich aufgrund des anderen Temperaturfeldes aus der *Thermischen Expansion oder Kontraktion* des Gebirges, den resultierenden Spannungsverhältnissen

und der *Konvergenz* ergeben. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung weitgehend der Variante B1.

#### 2.7.2.10 Advektion

Alle Varianten: Der advective Stofftransport erfolgt durch verschiedene Strömungsvorgänge im Grubengebäude sowie im Deck- und Nebengebirge. Er kann zur Alteration der Verschlüsse beitragen.

**Tab. 2.26** Auslösende FEP für das FEP *Advektion*

Auslösende FEP	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

#### 2.7.2.11 Diffusion

**Tab. 2.27** Beeinflussende FEP für das FEP *Diffusion*

Beeinflussende FEP	
Porosität	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
Geochemisches Milieu im Grubenbau	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Alle Varianten: Der diffusive Stofftransport ist von großer Bedeutung für die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, da er ein wesentlicher Transportprozess in zementhaltigen Materialien ist. Die Diffusionsgeschwindigkeit wird durch den nutzbaren Porenraum in Barrieren und Versatz bestimmt. Die Stoffdiffusion kann z. B. zur Durchmischung von Lösungen führen und so das Ausmaß der Zementkorrosion bestimmen.

Das *Geochemische Milieu im Grubenbau* spielt nur eine untergeordnete Rolle. Bei der Betrachtung des diffusiven Radionuklid-Transportes ist deren Speziation von Bedeutung.

Die Strömungsprozesse beeinflussen die Diffusionsprozesse dahingehend, dass sie Konzentrationsunterschiede verändern können.

Die Diffusionsgeschwindigkeit im Wirtsgestein hängt vor allem von den *Störungen und Klüften im Wirtsgestein* ab.

### **2.7.3 Nicht berücksichtigte FEP**

Die FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses, Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* und *Kanalisation in Dichtelementen* sind weniger wahrscheinlich und daher für das Referenzszenarium nicht zu berücksichtigen.

## 2.8 Konvergenz

Durch die Konvergenz wird der für die Speicherung von Fluiden verfügbare Hohlraum in den Grubenräumen reduziert und gleichzeitig die Permeabilität im Salzgrusversatz bzw. in den Verschlussbauwerken verringert. Die Konvergenz hat daher Auswirkungen auf den Fluiddruck in Grubenbauen sowie auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge und im Versatz, die wiederum die Konvergenz beeinflussen.

Das FEP beeinträchtigt die Funktion der Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“ und „Streckenverschlüsse“.

Unter der Ausprägung des FEP wird die Verformungsrate der Hohlraumkontur verstanden. Diese muss durch Modellrechnungen ermittelt werden. Im Folgenden werden daher nur die relevanten Einflüsse qualitativ dargestellt. Ein wichtiger Eingangsparameter bei den Modellrechnungen sind die Kriechklassen der Gesteine.

Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept ist die Konvergenz wesentlich, da sie der Motor für die Einspannung der geotechnischen Barrieren in das Gebirge und für die Kompaktion des Salzgrus-Versatzes ist, welcher zu entsprechenden Zeiten den sicheren Verschluss der Grubenräume gewährleistet.

Variante B1: Die langjährigen Konvergenzmessungen im Erkundungsbergwerk Gorleben belegen die gesteinspezifischen Unterschiede im Verformungsverhalten und erlauben eine Zuordnung der Gesteine zu den Kriechklassen gemäß BGR, die für die Konvergenz entscheidend sind. Da das Kriechverhalten des Salzes auch durch die Temperatur beeinflusst wird, sind thermische Einflüsse für die Konvergenzentwicklung wichtig.

Die *Konvergenz* der Grubenraumkonturen wird maßgeblich durch die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und die *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* im Gebirge beeinflusst. Die Änderung der Spannungsverhältnisse ergibt sich zunächst aufgrund der Störung des Primärspannungszustandes durch die Auffahrung der Grube. Später können sich Änderungen des Grundspannungszustandes durch Auflasten (Erhöhung der Schichtmächtigkeiten durch *Sedimentation*, Meeresüberflutung (*Transgression oder Regression*) oder *Inlandvereisung*) oder Entlastungen (z. B. Reduzierung der Schichtmächtigkeit durch *Erosion*) ergeben. Weitere Ursachen für Spannungsänderungen sind *Erdbeben*, Salzaufstieg (*Diapirismus*) und thermische

Einwirkungen durch die wärmeentwickelnden Abfälle (*Wärmeproduktion, Thermische Expansion oder Kontraktion*).

Zum Ende der Betriebsphase sind alle nicht mit Schotter verfüllten Grubenräume (Infrastrukturbereich) mit Salzgrus verfüllt. Durch die *Konvergenz* wird der Salzgrus kompaktiert und baut dabei fortschreitend einen Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt. In dieser Phase ist auch der in den Poren des Versatzes wirksame *Fluiddruck* von großer Bedeutung, da er als Stützdruck auch der Konvergenz entgegenwirkt. Der *Fluiddruck* wird zunächst durch die eingeschlossenen Luftmengen sowie durch geringe Lösungsmengen in den Einlagerungsbereichen mit wärmeentwickelnden Abfällen (Restfeuchte Behälterinnenraum, Versatzfeuchte, Fluid Inclusions) und größere mit den Abfallgebunden für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle eingebrachte Lösungsmengen bestimmt. Während der Nachverschlussphase werden begrenzte Lösungsmengen über die Schachtverschlüsse in den Infrastrukturbereich eindringen. Außerdem können hier aus Lösungsreservoirs im Leine-Salz bis zu 5.100 m<sup>3</sup> Fluide zutreten. Vor allem in den Einlagerungsbereichen für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle (Variante A) wird – aufgrund der größeren Lösungsmengen – eine intensive biogene und korrosive Gasbildung stattfinden, die den Fluiddruck erhöhen wird.

Der Abschluss der *Salzgruskompaktion* hängt davon ab, ob die Fluide im Versatz in andere Hohlräume wandern können oder, wenn sie eingeschlossen bleiben, wann sich ein Druckgleichgewicht zwischen Gebirgsdruck und Porendruck einstellt und die Kompaktion des Salzgruses zum Erliegen kommt. Durch vorübergehende inhomogene Verdichtungen kann es zur Ausbildung von Fließwegen mit erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten (*Kanalisation im Salzgrus*) kommen. Falls ungesättigte oder teilgesättigte Lösungen zutreten, kann es zunächst zur *Auflösung und Ausfällung* im Porenraum des Salzgrus kommen. Dies beeinflusst die mechanischen Eigenschaften des Versatzes und hat somit Einfluss auf die Konvergenz.

Lokal wird außerdem durch die Verschlussbauwerke ein Stützdruck auf das umgebende Gebirge ausgeübt, der der Konvergenz entgegen wirkt. Die *Schachtverschlüsse* und *Streckenverschlüsse* sind gegen thermo-mechanische und hydraulische Lasten ausgelegt. Falls die mechanische Stabilität der Verschlüsse nach einem Lösungszutritt durch Alteration (*Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, Auflösung und Ausfällung*), *Erdbeben oder Salzaufstieg (Diapirismus)* bzw. im Schachtbereich auch durch klimatische Einflüsse und tief reichende Erosion (*Glaziale Rinnenbildung*) beeinträchtigt wird, so hat dies auch Einflüsse auf die Konvergenz.

Aufgrund der geringen Lösungsmengen in den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Bereichen wird die Alteration der Streckenverschlüsse hier nur eine geringe Rolle spielen. Demgegenüber ist in den Schächten, wo Deckgebirgswässer anstehen, und in den Einlagerungsbereichen für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle, bei denen die Abfallgebinde größere Lösungsmengen enthalten, von einer begrenzten Alteration der Barrieren auszugehen.

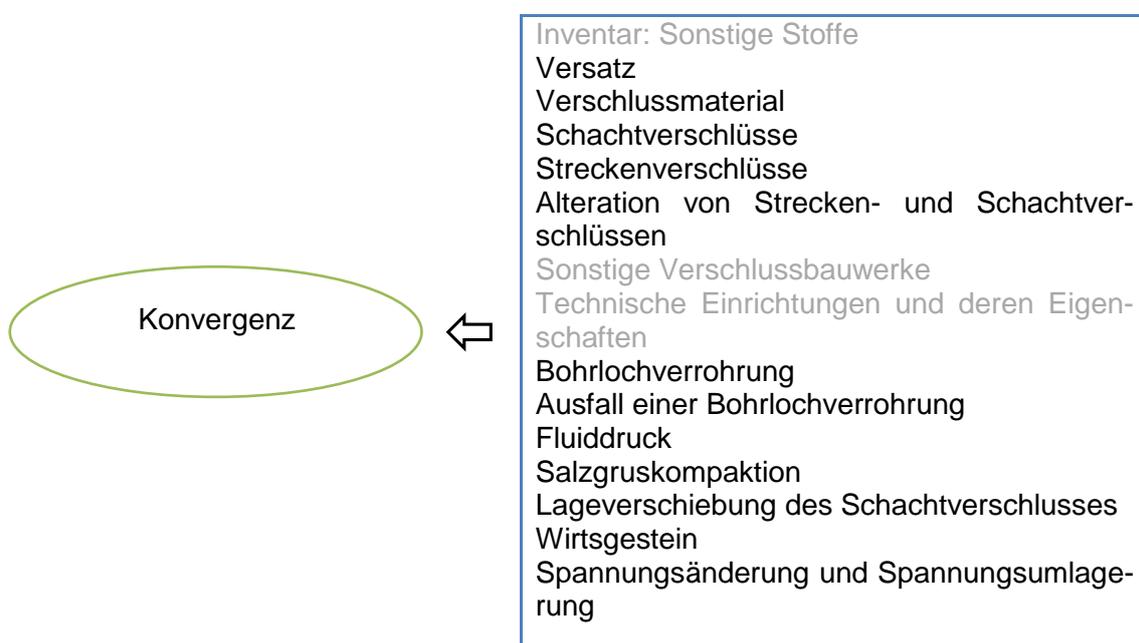
In den Einlagerungsbereichen tragen die POLLUX- und CASTOR-Behälter, deren Auslegung den Gebirgsdruck abdeckt, zusammen mit dem Versatz zum Aufbau eines Stützdruckes an die Hohlraumkontur bei. Da die Endlagerbehälter für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle nicht gegen den Gebirgsdruck ausgelegt sind, können sie durch den Gebirgsdruck, der durch Konvergenz und Versatz übertragen wird, zerstört werden.

In der frühen Nachverschlussphase werden die Einlagerungsbereiche und die angrenzenden Grubenräume durch die Zerfallswärme der eingelagerten radioaktiven Abfälle aufgeheizt. Die dadurch initiierte thermische Expansion des Salzgesteins sowie die resultierenden Spannungsänderungen im Wirtsgestein führen zu einer deutlichen Beschleunigung der Konvergenz. Im Salzgrusversatz kann die Feuchtigkeit im Nahfeld der wärmeentwickelnden Abfälle verdampfen und die reduzierte Feuchtigkeit wird die Kriechfähigkeit des Salzgrus reduzieren. Nach Abklingen der Aufheizung durch die Zerfallswärme kommt es durch Abkühlung und Kontraktion des Gesteins zu Spannungsänderungen. Gleichzeitig reduziert sich die Konvergenz im Grubengebäude.

Kontraktionen des Gesteins oder der Baustoffe durch Kaltzeiten wirken sich nur im Deckgebirge und in den obersten Bereichen des Salzstocks aus und sind somit nur für die oberen Teile der Schächte relevant. Eine tiefreichende Abkühlung der Gesteine ist in erster Linie während Kaltzeitphasen mit der Bildung von *Permafrost* zu erwarten. Eine mögliche Beeinträchtigung der Schachtverschlüsse /BIR 10/ wird erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse auftreten. In dieser Zeit (ab ca. 50.000 Jahre) bestehen keine Anforderungen mehr an die Stabilität der Schächte.

Variante B2: Entsprechend der Endlagerkonfiguration und den resultierenden Temperatur- und Spannungsverhältnissen im umgebenden Gebirge wird die Konvergenz von der Variante B1 abweichen.

Im Nahfeld wird die Konvergenz durch die CASTOR-Behälter und ihre *Wärmeproduktion*, die Großbohrlöcher (die Gleitschienen spielen keine relevante Rolle) und die großen Einlagerungsnischen vor den Bohrlöchern sowie deren Verfüllung mit trockenem Salzgrus bestimmt. Von Bedeutung ist außerdem der *Fluiddruck*, der aufgrund der geringen Lösungsmengen vor allem durch die Grubenluft und Korrosionsgase bestimmt wird. Er erzeugt einen Stützdruck, der der Konvergenz entgegenwirkt. Aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration werden die Mengen an feuchtem Salzgrus von der Variante B1 abweichen. Die anderen Einflussfaktoren auf die Konvergenz entsprechen der Variante B1.



**Abb. 2.8** Einflussfaktoren auf die *Konvergenz*

Variante C: Entsprechend der Endlagerkonfiguration und den resultierenden Temperatur- und Spannungsverhältnissen im umgebenden Gebirge wird die Konvergenz von der Variante B1 abweichen.

Im Nahfeld wird die *Konvergenz* durch die *Bohrlochverrohrung* und ihre Sandverfüllung, die *Wärmeproduktion* und die großen Einlagerungsnischen über den Bohrlöchern bestimmt. Von Bedeutung ist außerdem der *Fluiddruck*, der aufgrund der geringen Lösungsmengen vor allem durch die Grubenluft und Korrosionsgase (Korrosion der Bohrlochverrohrung und der Behälter) bestimmt wird. Er erzeugt einen Stützdruck, der der Konvergenz entgegenwirkt. Die Konvergenzentwicklung im Bereich der Strecken und Schächte hängt vom Temperatur- und Spannungsfeld ab. Aufgrund der unterschiedli-

chen Endlagerkonfiguration werden die Mengen an feuchtem Salzgrus von der Variante B1 abweichen. Die anderen Einflussfaktoren auf die Konvergenz entsprechen der Variante B1.

### 2.8.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.8.2 Beeinflussende FEP

#### 2.8.2.1 Versatz

Die Konvergenz der Grubenraumkontur wird durch die mechanischen Eigenschaften der eingebrachten Versatzmaterialien unterschiedlich stark behindert. Während der nicht kompaktierbare Versatz (Basalt, Serpentin) im Infrastrukturbereich und in den Schächten rasch einen Stützdruck aufbaut, wird die *Salzgruskompaktion* im übrigen Grubengebäude wenige 1000 Jahre andauern /WIE 12/.

Die Versatzmaterialien sind in allen Einlagerungsvarianten – mit Ausnahme der Bohrlochverfüllung in der Variante C – gleich, die Salzgrusmengen werden aber, aufgrund der unterschiedlichen Endlagerkonfigurationen, abweichen.

**Tab. 2.28** Beeinflussende FEP für das FEP Versatz

<b>Beeinflussende FEP</b>	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzgebirge
Konvergenz	Wärmeproduktion
Salzgruskompaktion*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Verdampfen von Wasser
Lösungen im Grubenbau	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Kanalisation im Salzgrus	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Durch die *Konvergenz* werden die Eigenschaften des Versatzes verändert (*Salzgruskompaktion* sowie *Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien*) und der Stützdruck auf die Streckenkante erhöht.

Auch die *Lösungen im Grubenbau* ändern die Versatzeigenschaften, z. B. die Feuchte im Versatz und die Kriecheigenschaften des Salzes.

Vorübergehende inhomogene Verdichtungen sind bei der Salzgruskompaktion nicht auszuschließen. Daher kann es zur Ausbildung von Fließwegen mit erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten kommen (*Kanalisation im Salzgrus*).

Im Fall eines Zutritts von teilgesättigten Lösungen, z. B. über die Schächte, kann es zu Auflösungs- und Ausfällungsprozessen im Versatz kommen.

Bei höherer Temperatur (*Wärmeproduktion* durch die eingebrachten radioaktiven Abfälle) steigt die Kriechfähigkeit des Salzes. Außerdem kann es zur *Thermischen Expansion oder Kontraktion* des Versatzes kommen.

Die *Thermochemische Sulfatreduktion* betrifft die Anhydritanteile im Salzgrusversatz und ändert dessen Eigenschaften /WEB 11/.

Variante B2: Unterschiede zur Variante B1 ergeben sich aufgrund der anderen Spannungsverhältnisse im Gebirge bezüglich der *Konvergenz* und der damit verknüpften *Salzgruskompaktion*, der *Lösungen im Grubenbau* (abweichende Mengen an feuchtem Versatz), der *Wärmeproduktion* und der *Thermischen Expansion oder Kontraktion*. Ob sich auch (signifikante) Auswirkungen auf die *Thermochemische Sulfatreduktion* ergeben, ist noch zu prüfen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Unterschiede zur Variante B1 ergeben sich bezüglich der *Konvergenz* und der dadurch beeinflussten *Salzgruskompaktion*, den *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen in Materialien* (Setzung der Sandverfüllung in den einlagerungsbohrlöchern), der *Lösungen im Grubenbau* (Restfeuchte im Sand, abweichende Mengen an feuchtem Salzgrus-Versatz), der *Wärmeproduktion*, der *Thermischen Expansion oder Kontraktion* und der *Thermochemischen Sulfatreduktion*. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.8.2.2 Verschlussmaterial

Die Konvergenz der Grubenraumkontur wird durch die mechanischen Eigenschaften der Verschlussmaterialien der Strecken- und Schachtverschlüsse behindert. Das Salzgebirge ist nach kurzer Zeit auf die Bauwerke aufgelaufen und es entwickelt sich an der Hohlraumkontur ein Stützdruck, der zu einer Verringerung der Konvergenzrate führt. Falls das Material der Bauwerke alteriert ist, ist deren Steifigkeit reduziert und der Stützdruck auf die Kontur geringer.

Variante B1: Während zukünftiger Kaltzeiten kann es zu einer tief reichenden Erosion durch *Glaziale Rinnenbildung* kommen, die die Funktion der oberen Dichtelemente der Schachtverschlüsse beeinträchtigen werden. Doch wird eine derartige Einwirkung erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse auftreten.

Für das Referenzszenarium ist anzunehmen, dass aufgrund der geringen Lösungsmengen nur eine geringfügige Alteration der Streckenverschlüsse im Ostflügel stattfinden wird. Da in den Schächten und in den Einlagerungsbereichen für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle (Westflügel) größere Wassermengen verfügbar sind, ist hier eine stärkere Alteration nicht ausgeschlossen.

*Auflösung und Ausfällung* sowie die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* sind Teilaspekte der Alteration. Die Alteration wird die mechanischen (und hydraulischen) Eigenschaften des *Verschlussmaterials* verändern, so dass der auf die Hohlraumkontur ausgeübte Stützdruck reduziert ist und somit auch die Konvergenz beeinflusst wird.

Die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* und das *Quellen des Bentonits* werden je nach Volumenzu- oder -abnahme des Materials den Stützdruck auf die Hohlraumkontur erhöhen oder reduzieren.

Die mechanischen Lasten aus der *Thermischen Expansion oder Kontraktion* des Gebirges durch die wärmeentwickelnden Abfälle sowie die Spannungsverhältnisse im Gebirge wurden bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt.

Varianten B2 und C: Aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration können die *Thermische Expansion oder Kontraktion*, die *Spannungsänderungen und Spannungs-*

*umlagerungen* sowie die *Konvergenz* anders ausgebildet sein als in der Variante B1. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.29** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

Beeinflussende FEP	Quellen des Bentonits
Glaziale Rinnenbildung	Auflösung und Ausfällung
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Konvergenz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Kanalisation in Dichtelementen	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.8.2.3 Schachtverschlüsse

Variante B1: Das standortspezifische Sicherheitserdbeben (7,3 MSK) und der Salzaufstieg (*Diapirismus*, Hebungsrate 0,02 mm/a) des Salzstocks wurden bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt /MÜL 12a/. Während der vorgesehenen Funktionsdauer wird die Funktion der Verschlüsse durch diese Prozesse nicht beeinträchtigt.

Nach der vorgesehenen Funktionsdauer können die Schachtverschlüsse durch kalzeitliche Einwirkungen (*Subrosion*, *Glaziale Rinnenbildungen*) in ihrer Funktion beeinträchtigt werden.

Die Eigenschaften der Schachtverschlüsse werden durch die *Verschlussmaterialien* und deren mögliche Alteration beeinflusst.

Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges, *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* sowie der *Fluiddruck* stellen mechanische und hydraulische Lasten dar, die bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt wurden /MÜL 12a/. In ähnlicher Weise wurden die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen der Baumaterialien* und das *Quellen des Bentonits* bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt.

**Tab. 2.30** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Diapirismus	Lageverschiebung eines Schachtverschlusses
Subrosion	Kanalisation in Dichtelementen
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Infolge der *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* durch Salzaufstieg (*Diapirismus*) wird die Einspannung des Verschlusses im Gebirge reduziert, was Auswirkungen auf die *Konvergenz* hat. Aufgrund der geringen Verschiebungsbeträge während der vorgesehenen Funktionsdauer wird die Funktion der Schachtverschlüsse dadurch nicht beeinträchtigt.

Die *Auflockerungszone* beeinflusst wesentlich die hydraulischen Eigenschaften des Schachtverschlusses. Im Referenzszenarium wird unterstellt, dass sie sich durch die *Konvergenz* und den Stützdruck der Barriere in der vorgesehenen Weise schließt.

Variante B2 und C: Aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration können die *Thermische Expansion oder Kontraktion*, die *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen*, die *Auflockerungszone* sowie die *Konvergenz* und der *Fluiddruck* anders ausgebildet sein als in der Variante B1. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### 2.8.2.4 Streckenverschlüsse

Alle Varianten: Die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung sind – abgesehen von den schachtspezifischen *FEP* (*Subrosion*, *Glaziale Rinnenbildung*, *Lageverschiebung*

des Schachtverschlusses, Quellen des Bentonits) – identisch mit dem FEP Schachtverschlüsse (s. Kapitel 2.8.2.3).

**Tab. 2.31** Beeinflussende FEP für das FEP Streckenverschlüsse

Beeinflussende FEP	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Diapirismus	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.8.2.5 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Variante B1: Durch eine Alteration können die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Verschlüsse beeinträchtigt werden. Um die chemische Stabilität der Barrieren über die vorgesehene Funktionsdauer zu gewährleisten, wurden Verschlussmaterialien sowie konstruktive Eigenschaften der Verschlüsse entsprechend dem aktuell beobachteten Chemismus der Lösungen im Wirtsgestein und Deckgebirge gewählt. Die entsprechenden Spezifikationen sind im Endlagerkonzept festgelegt und bilden die Grundlage für den Integritätsnachweis für die geotechnischen Barrieren /LIN 12/, /ENG 11/, /MÜL 11/, /MÜL 12a/.

*Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen* werden je nachdem, ob es sich um eine Volumenzunahme oder um eine Volumenabnahme handelt, zu einer Erhöhung oder Erniedrigung des Barrierendruckes auf die Hohlraumkontur führen.

Das *Geochemische Milieu im Grubenbau* und die *Hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge* sind wichtige Randbedingungen, die Art und Umfang der Alteration beeinflussen. Die *Auflösung und Ausfällung* sowie die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* sind Teilaspekte der Alteration.

**Tab. 2.32** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*

Beeinflussende FEP	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Streckenverschlüsse*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Auflockerungszone
Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Advektion
Lageverschiebung des Schachtverschlusses*	Diffusion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Der Stofftransport durch die Barriere erfolgt über *Diffusion*. Da für das Referenzszenarium unterstellt wird, dass sich die *Auflockerungszone* in der vorgesehenen Weise schließt, werden auch für den Stofftransport am Kontakt Barriere – Gebirge diffusive Prozesse unterstellt. Ein advektiver Stofftransport ist weniger wahrscheinlich. Diese Stofftransportprozesse können auch zur Alteration der Barrieren beitragen.

Varianten B2 und C: Von der Variante B1 abweichende Randbedingungen im Fernfeld umfassen die abweichenden Temperatur- und Spannungsverhältnisse. Diese beeinflussen auch die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse und über den verminderten Stützdruck die Konvergenz. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### 2.8.2.6 Bohrlochverrohrung

Das FEP ist nur für die Variante C relevant.

Die Bohrlochverrohrung ist entsprechend den Spannungsverhältnissen im Gebirge, unter Berücksichtigung von *Erdbeben*, *Diapirismus* und thermischen Einwirkungen, ausgelegt. Falls die mechanische Stabilität der Verrohrung, z. B. durch *Metallkorrosion*

oder *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* beeinträchtigt ist, kann es auch zu einem Ausfall der Verrohrung durch den Gebirgsdruck kommen.

**Tab. 2.33** Beeinflussende FEP für das FEP *Bohrlochverrohrung*

Beeinflussende FEP	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Metallkorrosion
Diapirismus	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Inventar: Metalle	Wärmeproduktion
Versatz*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Sonstige Verschlussbauwerke*	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Radiolyse
Konvergenz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck*	Hebung oder Senkung von Endlagerbehältern

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.8.2.7 Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Das FEP ist nur für die Variante C relevant.

**Tab. 2.34** Beeinflussende FEP für das FEP *Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

Beeinflussende FEP	Metallkorrosion
Diapirismus	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Bohrlochverrohrung*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Konvergenz	Fluiddruck*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Im Hinblick auf die *Konvergenz* sind für die Ausprägung des FEP *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* der von Innen und Außen wirkende *Fluiddruck*, die *Metallkorrosion* und die *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* (können beide die mechanische Stabilität der Verrohrung beeinflussen) sowie die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Gebirge relevant.

### 2.8.2.8 Fluiddruck

Der Fluiddruck übt einen Stützdruck auf den Versatz (Poreninnendruck) und die Hohlraumkontur der Grubenräume aus. Die auflaufende Gebirgskonvergenz führt zu einer Zunahme des Fluiddrucks, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen lithostatischem Druck und Fluiddruck einstellt und dabei die Konvergenz zum Erliegen kommt.

Viele Einflussparameter der Wechselwirkung zwischen Fluiddruck und Konvergenz sind in den Varianten B2 und C anders aufgeprägt. So sind aufgrund der anderen Endlagerkonfigurationen nicht nur die Spannungsverhältnisse im Gebirge und damit die Konvergenzen anders entwickelt, sondern auch die Lösungsmengen im Grubenbau (unterschiedliche Versatzmengen und -feuchten) und Gasmengen (durch abweichende Metallkorrosion durch andere Lösungsmengen und andere Materialien) weichen ab. Damit werden die Entwicklungen des *Fluiddrucks* und der *Konvergenz* anders ablaufen als in der Variante B1.

**Tab. 2.35** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung*	Quellen des Bentonits
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Wärmeproduktion
Konvergenz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der Fluiddruck wird durch die Lösungs- und Gasmengen im Grubengebäude bestimmt. Im Referenzszenarium des Endlagersystems treten nur geringe Feuchtemengen in den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle auf (Restfeuchte im Behälter und im Versatz, Gebirgsfeuchte). In die Einlagerungsbereiche für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle werden durch die Abfallbinde größere Lösungsmengen (ca. 6.772 t) eingebracht. Aus einem Lösungsreservoir im Leine-Salz können max. 5.100 m<sup>3</sup> Lösung sowie durch die Schachtverschlüsse einige 100 m<sup>3</sup> in den Infrastrukturbereich zutreten. Der Gasdruck wird zunächst durch die eingeschlossene Luft bestimmt. Später wird er durch die Gasbildung (biogen, Korrosion und Radiolyse), vor allem im Bereich mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen

erhöht. Weiteres Gas kann aus den Kohlenwasserstoff-Vorkommen und der *Thermochemischen Sulfatreduktion* resultieren. Falls der Gasdruck die Minimalspannung des Gebirges überschreitet, kann es zur *Fluidinfiltration in das Wirtsgestein* kommen, wobei die Integrität des Gesteins nicht beeinträchtigt wird.

Durch Volumenänderungen infolge der *Konvergenz* der Hohlraumkontur, durch *Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien*, durch das *Quellen von Bentonit*, durch die *Wärmeproduktion* und durch die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Salzgebirges und der Baustoffe wird der Fluiddruck beeinflusst.

Variante B2: Aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration können die *Wärmeproduktion*, die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie die Gebirgsspannungen (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*) anders ausgebildet sein als in der Variante B1. Falls aufgrund des (vor allem im Nahfeld) leicht abweichenden geochemischen Milieus, der anderen Lösungsmengen und den anderen Behältermaterialien die Korrosion anders abläuft, kann auch die *Gasmenge im Grubenbau* abweichen.

Variante C: In der Variante C wird die Restfeuchte in der Sandverfüllung zu einer abweichenden Metallkorrosion und eine verstärkte Gasbildung führen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### **2.8.2.9 Salzgruskompaktion**

Durch die Kompaktion des Salzgrusversatzes infolge der Konvergenz nimmt dessen Festigkeit zu, während die Porosität und die Permeabilität abnehmen. Dadurch erzeugt der Salzgrus im Gegenzug einen zunehmenden Stützdruck auf die Hohlraumkontur und bremst die Konvergenz.

Aufgrund der abweichenden Spannungsverhältnisse im Gebirge werden die Konvergenz und die Salzgruskompaktion in den Varianten B2 und C anders ablaufen als in der Variante B1.

**Tab. 2.36** Beeinflussende FEP für das FEP *Salzgruskompaktion*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Konvergenz
Brennelement-Behälter	Fluiddruck
Sonstige Endlagerbehälter	Lösungen im Grubenbau
Versatz	Spannungsänderung und Spannungs- umlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der Ablauf der Salzgruskompaktion hängt primär von den materialspezifischen Eigenschaften des *Versatzes* sowie von der *Konvergenz*, die von den Spannungsverhältnissen im Gebirge (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*) bestimmt wird, ab. In den Einlagerungsstrecken wird die Salzgruskompaktion durch die mechanische Stabilität der *Brennelement-Behälter* und Sonstigen Endlagerbehälter beeinflusst.

Geringe Lösungsmengen, wie sie im Referenzszenarium in den BE/HAW-Einlagerungsbereichen zu unterstellen sind, können die Salzgruskompaktion beschleunigen. Bei größeren Lösungsmengen, z. B. beim Lösungszutritt aus Lösungsreservoirs im Leine-Salz, und durch die Konvergenz können sich höhere Lösungsdrücke aufbauen, die der Salzgruskompaktion entgegenwirken.

Varianten B2 und C: Die Spannungsverhältnisse im Gebirge (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*), die *Konvergenz*, der *Fluiddruck* und die *Lösungen im Grubenbau* (geringere Versatzfeuchte im Grubengebäude, höhere Feuchte in den Einlagerungsbohrlöchern (Variante C) durch Sandverfüllung) werden in den Varianten B2 und C von den Verhältnissen in der Variante B1 abweichen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1. Die Brennelement-Behälter sind bei der Variante C für die Salzgruskompaktion nicht relevant, da sie sich innerhalb einer Bohrlochverrohrung befinden, die mit Sand verfüllt wird.

### 2.8.2.10 Wirtsgestein

Bezüglich der rheologischen Eigenschaften werden die Ablagerungen des Wirtsgesteins in Homogenbereiche mit unterschiedlichen Kriechklassen eingeteilt. Demnach weisen die Gesteine der Leine-Folge geringere Kriecheigenschaften auf als die Ge-

steine der Staßfurt-Folge. Neben thermischen, mechanischen und hydraulischen Einflüssen bestimmen die Kriechklassen das Konvergenzverhalten der Gesteine.

Variante B1: Die Wirtsgesteinseigenschaften haben wesentlichen Einfluss auf den Ablauf thermischer, mechanischer, hydraulischer und chemischer Prozesse im Endlagerbereich. Die Auswirkungen relevanter FEP auf das Wirtsgestein werden im Integritätsnachweis für die geologische Barriere bewertet.

*Erdbeben, Salzaufstieg (Diapirismus) und die Bildung kryogener Klüfte* verändern die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein und wirken sich so auf die Konvergenz aus.

*Subrosion und Glaziale Rinnenbildungen* führen zu einem Sedimentabtrag. Daraus resultieren aufgrund der verminderten Auflast veränderte Spannungsverhältnisse im Gebirge, die zu einer geringeren Konvergenz führen.

Bei einem Zutritt ungesättigter oder teilgesättigter Lösungen zum Bergwerk kann es zur Auflösung entsprechender Salzgesteine kommen (*Auflösung und Ausfällung*).

Die *Wärmeproduktion* der wärmeentwickelnden Abfälle führt zur *Thermischen Expansion* oder (bei der späteren Abkühlung zur) *Kontraktion* des umgebenden Wirtsgesteins. In der Folge kann es zu *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* kommen, die die Konvergenz beeinflussen. Außerdem könnte es bei einer Eisüberdeckung durch die Auflast zu Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein kommen.

Die *Auflockerungszone, Klüfte und Störungen im Wirtsgestein* sowie *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* verändern bzw. bestimmen das Verformungsverhalten der Salzgesteine.

Varianten B2 und C: Die *Wärmeproduktion, die Thermische Expansion oder Kontraktion, die Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie die *Konvergenz* werden aufgrund der veränderten Endlagerkonfiguration gegenüber der Variante B1 anders ausgebildet sein. Dies wirkt sich auch auf das Wirtsgestein aus.

**Tab. 2.37** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

### 2.8.2.11 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein sowie Konvergenz an der Hohlraumkontur beeinflussen sich wechselseitig.

Aufgrund der geänderten Endlagerkonfigurationen werden die Spannungsverhältnisse in den Varianten B2 und C abweichen.

**Tab. 2.38** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

Auslösende FEP	Verschlussmaterial*
Erdbeben	Schachtverschlüsse*
Sedimentation	Streckenverschlüsse*
Diapirismus	Sonstige Verschlussbauwerke*
Transgression oder Regression	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Inlandvereisung in randlicher Lage	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Ausfall eines Dichtpfropfens
Glaziale Rinnenbildung	Konvergenz
Thermische Expansion oder Kontraktion	Fluiddruck

<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Brennelement-Behälter	Salzgruskompaktion*
Sonstige Endlagerbehälter	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Versatz*	Quellen des Bentonits
Bohrlochverrohrung*	Wirtsgestein*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Deck- und Nebengebirge
Technische Eigenschaften und deren Eigenschaften	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: *Erdbeben* können Spannungskonzentrationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten induzieren. In ähnlicher Weise können sich durch einen Salzaufstieg (*Diapirismus*) im Bereich von Materialinhomogenitäten oder bei lokal unterschiedlichen Verformungsraten Spannungen im Wirtsgestein aufbauen.

Der Grundspannungszustand im Gebirge wird außerdem durch mechanische Auflast bzw. Entlastung durch die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges, durch eine Erhöhung der Schichtmächtigkeiten durch *Sedimentation* (z. B. während einer Kaltzeit oder während einer Transgression), durch eine Meeresüberflutung infolge einer *Transgression* (bei einer Warmzeit) oder *Regression* (bei einer Abkühlung), durch die Gletscherauflast bei einer *Inlandvereisung* oder durch eine Reduzierung der Deckgebirgsmächtigkeit durch Erosion infolge *Glazialer Rinnenbildung* verändert und wirkt sich so auf die Konvergenz aus.

Die Erwärmung des Salinars durch die wärmeentwickelnden Abfälle führt zur *Thermischen Expansion* oder (bei der anschließenden Abkühlung zur) *Kontraktion* im Gebirge. In der Folge werden Spannungsänderungen bzw. Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein induziert.

Im Umfeld des Grubengebäudes wird die Gebirgsspannung durch die mechanischen Eigenschaften der *Brennelement-Behälter*, durch die Steifigkeit des *Versatzes* (Grad der Salzgruskompaktion), des *Verschlußmaterials*, der *Streckenverschlüsse* und der *Schachtverschlüsse* beeinflusst. Dabei kann ein Aufquellen eines Baumaterials zu einer Druckerhöhung und eine Setzung (z. B. einer Schottersäule) zu einer Druckerniedrigung führen.

Die *Lageverschiebung eines Schachtverschlusses* würde lokal im betrachteten Verfüllabschnitt zu Steifigkeitsänderungen und damit zu Spannungsänderungen bzw. -umlagerungen führen.

Außerdem kann ein entsprechend hoher *Fluiddruck* einen Stützdruck auf das Gebirge ausüben und damit die Spannungsverhältnisse ändern.

Die Eigenschaften des *Wirtsgesteins* sowie des *Deck- und Nebengebirges* beeinflussen die Spannungsänderungs- bzw. Spannungsumlagerungsprozesse.

Variante B2: Die *Brennelement-Behälter*, der *Versatz* (Versatzmenge), die *Technischen Einrichtungen*, die *Konvergenz* und der *Fluiddruck* werden anders als in der Variante B1 ausgebildet sein. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Die *Bohrlochverrohrung* wird gemäß den Spannungsverhältnissen im Gebirge ausgelegt. Falls die mechanische Stabilität der Verrohrung durch Korrosion beeinträchtigt wird, kann es zum *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* kommen. Die Endlagerbehälter werden erst nach einem Ausfall der Verrohrung durch die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflusst. Weiterhin werden die FEP *Versatz* (Salzgrusmenge, Sandverfüllung), die *Konvergenz*, der *Fluiddruck* und die *Salzgruskompaktion* anders ausgebildet sein als in der Variante B1. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.8.3 Nicht berücksichtigte FEP

Das *Inventar: Sonstige Stoffe*, die *Sonstigen Verschlussbauwerke* und die *Technischen Einrichtungen und deren Eigenschaften* werden sich nicht signifikant auf die Konvergenz auswirken. Im *Inventar: Sonstige Stoffe* sind auch die Verfüllmaterialien subsummiert. Aufgrund der geringen Dimensionen der Bohrungen werden sich diese nicht relevant auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge auswirken. Die *Sonstigen Verschlussbauwerke* sind keine Initial-Barrieren und daher hier nicht zu betrachten. Die *technischen Einrichtungen zu Grubenraumstabilisierung* (Anker, Streckenausbau) sind nur für die Betriebsphase relevant.

## 2.9 Fluiddruck

Der Fluiddruck ist der an einem bestimmten Referenzpunkt in einem Grubenbau herrschende Druck im Gas bzw. in der Lösung. Während der Fluiddruck in der gesamten Gasmenge praktisch konstant ist, nimmt der Fluiddruck in der Lösung durch den hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule nach unten hin zu. Die Höhe der Flüssigkeitssäule hängt vom betrachteten Szenarium ab.

Bei der erwarteten Systementwicklung sind in den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle nur geringe Lösungsmengen (Restfeuchte im Salzgrus, Gebirgsfeuchte, Restfeuchte in den Behältern) zu unterstellen. In den Infrastrukturbereich können aus einem Lösungsreservoir in der Leine-Folge maximal 5.100 m<sup>3</sup> zufließen, weiterhin einige 100 m<sup>3</sup> Deckgebirgslösungen durch die Schachtverschlüsse. In den westlichen Einlagerungsbereichen für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle werden neben der Restfeuchte im Versatz und der Gebirgsfeuchte größere Lösungsmengen (ca. 6.772 t) mit den Abfallgebinden eingebracht. Der Fluiddruck wird daher vor allem durch die eingeschlossene Grubenluft und Gase durch biogene Degradation und Korrosion bestimmt.

Das FEP wirkt auf die Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“, „Streckenverschlüsse“ und „Wirtsgestein“.

Unter der Ausprägung des FEP wird neben dem Fluiddruck in Grubenräumen und Behältern vor allem der Porendruck im Versatz der Grubenräume verstanden. Die Fluiddrucke müssen durch Modellrechnungen ermittelt werden. Im Folgenden werden daher nur die relevanten Einflüsse qualitativ dargestellt.

Variante B1: Der Fluiddruck wird vorrangig vom Gasdruck und der *Gasmenge im Grubengebäude* bestimmt. Die Gase resultieren einerseits aus der eingeschlossenen Grubenluft und andererseits aus der Gasbildung durch die *Mikrobiellen Prozesse im Grubenbau* und durch die *Metallkorrosion* sowie in geringerem Maße aus der *Radiolyse* und dem *Verdampfen von Wasser*. Da die auslösenden Prozesse der *Gasbildung* von der vorhandenen Lösungsmenge im Grubengebäude abhängen, ist vor allem in den Einlagerungsbereichen mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen eine ausgeprägte Gasbildung zu erwarten, da hier mit den Abfallgebinden größere Lösungsmengen eingebracht werden. Die temporär variierende Gasbildung ist ein zu betrachtender Einflussfaktor bezüglich einer Bewertung der mechanischen oder hydraulischen

Auswirkungen des Fluiddruckes im Endlager auf die Barrierenintegrität. Hinzu kommt noch das Konvergenzverhalten des umgebenden Gesteins, das den für eine Gasaufnahme zur Verfügung stehenden Poren- und Hohlraum im *Versatz* mit der Zeit verringert.

Wichtig für die Systementwicklung sind demnach neben der Gasbildung die Konvergenz und der sie auslösende Prozess: die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*. Zwischen der *Konvergenz* und *Fluiddruck* besteht eine enge Wechselwirkung: Die Konvergenz erhöht den Fluiddruck, gleichzeitig wirkt der Fluiddruck (über den Porendruck) als Stückdruck der Konvergenz entgegen. Ein über den Gebirgsdruck hinausgehender Fluiddruck ist aber nicht zu erwarten, da es dann zur *Fluidinfiltration in das Wirtsgestein* kommen würde. Gasfrac-Ereignisse im Wirtsgestein brauchen daher nicht betrachtet zu werden.

Wichtig für die Systementwicklung ist die Verlangsamung der *Salzgruskompaktion* sowie der Rückbildung von Schädigungen in der *Auflockerungszone* durch den Porendruck. Außerdem werden die Mengen an sich bildenden bzw. von außen zutretenden Gasen und Flüssigkeiten sowie viele chemische Prozesse, wie z. B. Lösungs-/ Fällungsreaktionen, vom Fluiddruck beeinflusst.

Die Verschlussbauwerke und Dichtpfropfen sind so ausgelegt, dass ihre erwartete Funktionalität von Fluiddrücken, die den Gebirgsdruck nicht übersteigen, nicht beeinträchtigt wird.

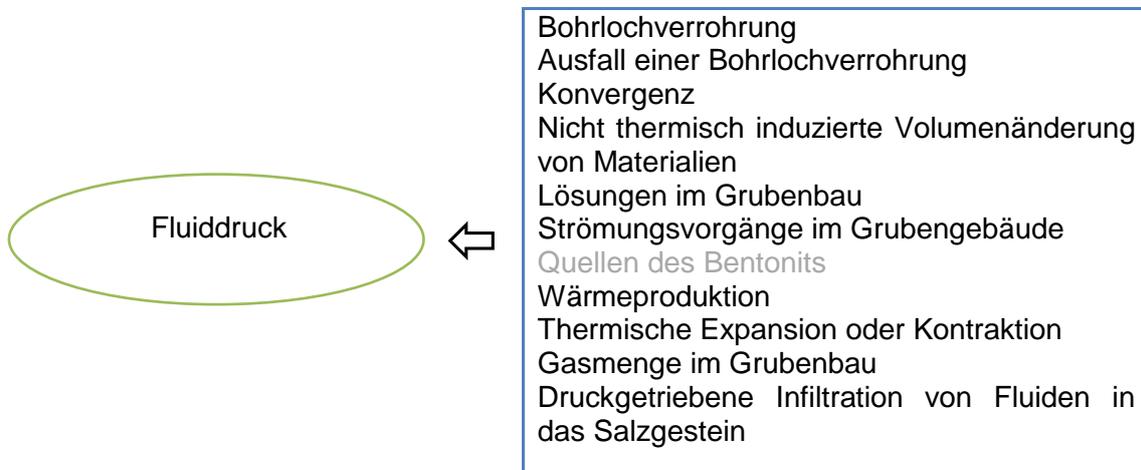
Varianten B2 und C: Entsprechend der anderen Grubenraumgeometrie und dem unterschiedlichen Temperaturfeld ergeben sich abweichende Spannungsverhältnisse im Gebirge, die sich über die *Konvergenz* auch auf den Fluiddruck auswirken.

Weiterhin ergeben sich beim Vergleich zwischen den Varianten Unterschiede bezüglich der Lösungsmengen (*Lösungen im Grubenbau*) aufgrund der Versatzfeuchte in den verschiedenen Salzgrusmengen, in der Sandverfüllung der Einlagerungsbohrlöcher (mit 0,2 Gew.-% Restfeuchte, Variante C) sowie der differierenden Restfeuchte in den Behältern.

Unterschiede in der *Gasbildung* ergeben sich weiterhin durch unterschiedliche Behältermaterialien und -mengen sowie aus der *Radiolyse* (Behälter in der Variante C nur teilweise abgeschirmt).

Eine *Druckgetriebene Infiltration der Fluide in das Salzgestein* wird aufgrund der begrenzten Gasbildungsraten in beiden Varianten nicht relevant sein.

Die anderen Einflussfaktoren entsprechen der Variante B1. Ein deutlicher Unterschied zwischen den Fluiddrücken der Varianten wird nicht erwartet.



**Abb. 2.9** Einflussfaktoren auf den *Fluiddruck*

### 2.9.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.9.2 Beeinflussende FEP

#### 2.9.2.1 Bohrlochverrohrung

Variante C: Dieses FEP ist nur für die Variante C zu betrachten.

Die Bohrlochverrohrung wird entsprechend den Spannungsverhältnissen im Gebirge und den von Innen und Außen einwirkenden Fluiddrücken ausgelegt. Falls die mechanische Stabilität der Verrohrung z. B. durch chemische Einwirkungen (*Metallkorrosion*) reduziert wird, kann es zu einem *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* kommen.

Im Hinblick auf die Ausprägung des Fluiddrucks sind für das FEP *Bohrlochverrohrung* das Material der Verrohrung (*Inventar: Metalle*), die *Konvergenz*, die *Metallkorrosion* und die *Radiolyse* (tragen beide zur Gasbildung bei) sowie die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Gebirge relevant.

**Tab. 2.39** Beeinflussende FEP für das FEP *Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*
Erdbeben	Metallkorrosion
Diapirismus	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Inventar: Metalle	Wärmeproduktion*
Versatz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Sonstige Verschlussbauwerke	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Radiolyse
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	Hebung oder Senkung von Endlagerbehältern

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

**2.9.2.2 Ausfall einer Bohrlochverrohrung**

Dieses FEP ist nur für die Variante C zu betrachten.

Im Hinblick auf den *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* sind die FEP zu betrachten, die die mechanische Stabilität der Verrohrung beeinträchtigen können (*Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*).

**Tab. 2.40** Beeinflussende FEP für das FEP *Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Metallkorrosion
Diapirismus	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Bohrlochverrohrung*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Konvergenz*	Fluiddruck

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.9.2.3 Konvergenz

Die Gebirgsspannungen führen zur Konvergenz der Hohlraumkontur. Durch diese Verformungen wird auch der Fluiddruck beeinflusst.

Da die Grubengebäudegeometrie und der Wärmeeintrag die Spannungsverteilung im Gebirge beeinflussen, werden sich in den verschiedenen Varianten auch Unterschiede bei der Konvergenzentwicklung ergeben. Die *Konvergenz* und der *Fluiddruck* stehen in Wechselwirkung.

**Tab. 2.41** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*

Beeinflussende FEP	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Sonstige Stoffe	Bohrlochverrohrung
Versatz	Ausfall einer Bohrlochverrohrung*
Verschlussmaterial	Fluiddruck
Schachtverschlüsse	Salzgruskompaktion
Streckenverschlüsse	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Wirtsgestein
Sonstige Verschlussbauwerke	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der *Fluiddruck* und die *Konvergenz* werden durch die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Versatz- und Verschlussmaterialien sowie der Strecken- und Schachtverschlüsse und den resultierenden Stützdruck, den sie auf die Hohlraumkontur ausüben, beeinflusst. Bei einer Alteration der Verschlüsse kann die mechanische Stabilität der Verschlüsse reduziert sein, was den Stützdruck beeinflusst.

Gleichzeitig wirkt sich der Fluiddruck über den Porendruck im *Versatz* auch auf den Stützdruck und somit auf die *Konvergenz* aus.

Die *Salzgruskompaktion* wird über den Porendruck durch den Fluiddruck beeinflusst und bestimmt den Stützdruck auf die Hohlraumkontur.

Die Zusammensetzung des Salinars (z. B. Verunreinigungen) beeinflussen die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein und wirken sich über die Konvergenz auf den Fluiddruck aus.

Die FEP *Bohrlochverrohrung* und *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* sind für das hier betrachtete Streckenlagerungskonzept B1 nicht relevant.

Varianten B2 und C: Die FEP *Versatz* (Versatzmenge, wichtiger Speicherraum für Fluide), *Fluiddruck*, *Salzgruskompaktion* sowie *Spannungsänderung* und *Spannungsumlagerung* werden im Vergleich zur Variante B1 anders ausgebildet sein.

Da der Gebirgsdruck bereits vor der Einlagerung auf die Verrohrung aufgelaufen ist, ist das FEP *Bohrlochverrohrung* für die Konvergenz nur von untergeordneter Bedeutung (Variante C).

#### **2.9.2.4 Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen**

Jede Volumenänderung von Materialien in den Grubenräumen wirkt sich automatisch auch auf den Fluiddruck aus. Art und Umfang der Volumenänderungen sind material-spezifisch (*Quellen des Bentonits, Versatz, Verschlussmaterial, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*) und werden durch die *Lösungen im Grubenbau* und das *Geochemische Milieu im Grubenbau* bestimmt. Da die Korrosionsprozesse aufgrund der begrenzten Lösungsmengen nur in geringem Umfang stattfinden, haben die Volumenänderungen durch Korrosion für die Ausprägung des FEP *Fluiddruck* nur eine geringe Bedeutung, aber die durch die Metallkorrosion ausgelöste Gasbildung ist für den Fluiddruck wichtig. Von besonderer Bedeutung für den *Fluiddruck* sind Volumenänderungen durch die *Konvergenz*, die *Salzgruskompaktion* und den Zutritt weiterer Lösungen (*Lösungen im Grubenbau*).

Die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften sind in allen Varianten gleich.

**Tab. 2.42** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen*

<b>Auslösende FEP</b>	
Salzgruskompaktion	Streckenverschlüsse
Quellen des Bentonits*	Sonstige Verschlussbauwerke
Metallkorrosion	Konvergenz*
Korrosion der Brennstoffmatrix	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Korrosion von Glas	Lösungen im Grubenbau*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Inventar: Sonstige Stoffe	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Versatz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Verschlussmaterial	Thermochemische Sulfatreduktion
Schachtverschlüsse	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.9.2.5 Lösungen im Grubenbau

Die Lösungen im Grubengebäude tragen zum Fluiddruck bei.

Die Lösungsmengen ergeben sich vor allem durch die mit dem Salzgrus, der Sandverfüllung der Bohrlöcher (Variante C) und den Abfallgebinden eingebrachter Feuchtigkeit. Daher ergeben sich Unterschiede bei den Varianten.

Variante B1: Ein Lösungszutritt über die Schächte oder aus dem Wirtsgestein wird die Lösungsmengen im Grubengebäude und damit den Fluiddruck erhöhen.

Das *Inventar: Sonstige Stoffe* umfasst feuchtehaltige Abfall- sowie Behälterbaustoffe (vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle), die zu den Lösungen im Grubenbau beitragen. Außerdem werden mit dem *Versatz* und zementhaltigen *Verschlussmaterialien* Lösungen in das Grubengebäude eingebracht. *Strömungsvorgänge im Grubengebäude* bewegen Lösungen in einem Grubenbau und tragen zum Druckausgleich in den verschiedenen Bereichen des Grubengebäudes bei.

*Auflösung und Ausfällung*, Korrosionsprozesse, *Zersetzung von Organika* und *Verdampfen von Wasser* sind Prozesse, die die Lösungsmenge reduzieren.

Varianten B2 und C: Die Ausprägung der FEP *Versatz* (Restfeuchte im Salzgrus und in der Variante C in der Sandverfüllung der Bohrlöcher) und *Metallkorrosion* werden von der Variante B1 abweichen.

**Tab. 2.43** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lösungen im Grubenbau*

Auslösende FEP	Metallkorrosion
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Korrosion der Brennstoffmatrix
Beeinflussende FEP	Auflösung und Ausfällung
Radiolyse	Inventar: Sonstige Stoffe
Verdampfen von Wasser	Versatz
Wärmeproduktion*	Verschlussmaterial
Zersetzung von Organika	Strömungsvorgänge im Grubengebäude*
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Thermochemische Sulfatreduktion	Abfallmatrix

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.9.2.6 Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Bei der Strömung von Fluiden (z. B. durch hydrodynamische Prozesse) ändert sich ihr Druck. Damit tragen die Strömungsvorgänge zum Druckausgleich in den verschiedenen Bereichen des Grubengebäudes bei.

Variante B1: Die *Konvergenz* führt zur Komprimierung und Auspressung der Fluide. Da die Verschlussbauwerke nicht absolut gasdicht sind, wird es durch die Konvergenz zu einer Gasströmung im Grubengebäude kommen.

Der Lösungszutritt ist bereits ein Strömungsprozess, der die Menge der Lösungen im Grubenbau erhöht.

*Porosität* und *Permeabilität* sind entscheidende Randbedingungen für Strömungsprozesse im Grubengebäude.

*Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen* können Lösungen verdrängen und Strömungsprozesse auslösen.

Die Menge an vorhandenen Lösungen und Gasen hat entscheidenden Einfluss auf die ablaufenden Strömungsprozesse.

Beim Ausfall eines Dichtpfropfens kann ggf. Lösung aus dem feuchten Salzgrus in die Einlagerungsfelder gelangen bzw. Fluide von dort in die Richtstrecken.

Wird der Gaseindringdruck der Barrieren überschritten, wird die Gasströmung zum dominierenden Strömungsvorgang.

Durch Temperaturänderungen kommt es zu Dichteänderungen von *Fluiden (Thermische Expansion oder Kontraktion)*. Darüber hinaus können Konvektionsströmungen ausgelöst werden.

Das *Geochemische Milieu im Grubenbau* beeinflusst die Viskositäten der Fluide.

**Tab. 2.44** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Strömungsvorgänge im Grubengebäude*

<b>Auslösende FEP</b>	
Konvergenz*	Permeabilität
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Lösungen im Grubenbau*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Gasmenge im Grubenbau*
Fluiddruck	Gaseindringdruck
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Porosität	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	Ausfall eines Dichtpfropfens

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B2 und C: Die *Lösungen im Grubenbau* werden maßgeblich von der Restfeuchte im Versatz bestimmt und unterscheiden sich daher aufgrund der unterschiedlichen Versatzmengen bei den Endlagervarianten. Das FEP *Ausfall einer Bohrlochver-*

*rohrung* ist nur für die Variante C relevant. Die Ausprägung der FEP *Konvergenz, Fluiddruck, Thermische Expansion oder Kontraktion* und *Gasmenge im Grubenbau* werden aufgrund der abweichenden Temperatur- und Spannungsverhältnisse von der Variante B1 abweichen.

Die anderen FEP werden in ihrer Ausprägung der Variante B1 entsprechen.

### 2.9.2.7 Wärmeproduktion

Durch die Erwärmung kann sich bei verhinderter Ausdehnung der Druck in den Flüssigkeiten und Gasen ändern.

Die Wärmeleistung der Behälter und die räumliche Verteilung der Wärmequellen unterscheiden sich bei den verschiedenen Varianten. Der radioaktive Zerfall ist für den Fluiddruck nicht relevant.

**Tab. 2.45** Auslösende FEP für das FEP *Wärmeproduktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Radioaktiver Zerfall
-----------------------	----------------------

### 2.9.2.8 Thermische Expansion oder Kontraktion

Eine thermisch bedingte Ausdehnung oder Volumenverringerng der Fluide, des Gebirges oder der Barrieren kann den Fluiddruck beeinflussen.

Da das Temperaturfeld bei den verschiedenen Varianten unterschiedlich ausgebildet ist, können sich auch Abweichungen bei der Ausprägung des FEP ergeben.

**Tab. 2.46** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Brennelement-Behälter
Permafrost	Versatz
Inlandvereisung in randlicher Lage	Verschlussmaterial
Vollständige Inlandvereisung	Sonstige Verschlussbauwerke
Wärmeproduktion*	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
<b>Beeinflussende FEP</b>	Bohrlochverrohrung*
Abfallmatrix	Wirtsgestein
Sonstige Endlagerbehälter	Deck- und Nebengebirge

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Durch Klimaentwicklungen bedingte tiefreichende Temperaturänderungen betreffen nur das Deckgebirge, den obersten Bereich des Wirtsgesteins sowie den oberen Teil der Schächte. Für den Fluiddruck im Grubengebäude sind diese Entwicklungen daher nur von geringer Bedeutung.

Im Unterschied dazu wirkt sich die Wärmeproduktion durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle (*Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter*) über die *Thermische Expansion oder Kontraktion* direkt auf die Grubenräume und damit auf den *Fluiddruck* aus.

Die materialspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien im Endlagersystem bestimmen deren thermische Expansion oder Kontraktion. Für den *Fluiddruck* ist vor allem die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des *Wirtsgesteins* relevant.

Varianten B2 und C: Aufgrund unterschiedlicher Behälter und Endlagerkonzepte werden die FEP *Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Versatz* und *Bohrlochverrohrung* (Variante C) eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Die anderen FEP werden in ihrer Ausprägung der Variante B1 entsprechen.

### 2.9.2.9 Gasmenge im Grubenbau

Die sich bildende Gasmenge im Grubenbau erhöht den Fluiddruck und kann die hydrostatischen Drücke in Lösungen und anderen Flüssigkeiten beeinflussen.

**Tab. 2.47** Beeinflussende FEP für das FEP *Gasmenge im Grubenbau*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein*
Strömungsvorgänge im Grubengebäude*	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Gasbildung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: *Strömungsvorgänge* (von Gas und Flüssigkeit) *im Grubengebäude* können die Gasmenge im Grubenbau verändern. Die *Gasbildung* führt zur Erhöhung der Gasmenge im Grubenbau.

Fluid- und Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein enthalten in den meisten Fällen auch eine Gasphase. Diese Gasmengen können in den Grubenbau zutreten.

Wenn der Gasdruck die minimale Hauptspannung im Gebirge überschreitet, kommt es zur Infiltration von Gasen in das Wirtsgestein, die die Gasmenge im Grubenbau verringert.

Varianten B2 und C: Die *Gasbildung* wird in den Varianten durch die verschiedenen Lösungsmengen (Restfeuchte im Versatz bzw. Sandverfüllung in Variante C) und die resultierende Intensität der *Metallkorrosion* sowie durch *Radiolyse* (nicht abgeschirmte Behälter in der Variante C, Radiolyse der Restfeuchte in der Sandverfüllung der Bohrlöcher) differieren. Die anderen FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.9.2.10 Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Wenn der Fluiddruck die minimale Hauptspannung im Gebirge überschreitet, kommt es zum Abströmen von Fluiden ins Wirtsgestein. Dieser Prozess wirkt als hydraulische Drossel und begrenzt den Fluiddruckanstieg.

Dieses FEP ist in vor allem für Bereiche mit rascher und intensiver Gasbildung relevant (vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle im Westflügel, Variante A).

**Tab. 2.48** Beeinflussende FEP für das FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Fluiddruck	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
Wirtsgestein	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Variante B1: Voraussetzung für eine Fluidinfiltration in das Gebirge ist eine Überschreitung der kleinsten Hauptspannung durch den *Fluiddruck*. Falls der erforderliche Fluiddruck nicht erreicht wird, kommt es nicht zur Infiltration.

Die lithologischen Eigenschaften des *Wirtsgesteins* (z. B. Homogenität, Anhydritanteil) bestimmen maßgeblich die Ausbildung des intergranularen Porenraums, der Voraussetzung für eine Fluidinfiltration ist.

*Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* wirken als bevorzugte Wegsamkeiten, die einer Fluidinfiltration Vorschub leisten können.

Varianten B2 und C: Unterschiede werden sich durch die Ausprägung der FEP *Fluiddruck* und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* ergeben.

### 2.9.3 Nicht berücksichtigte FEP

Das *Quellen des Bentonits* betrifft das obere Dichtelement des Schachtverschlusses und ist daher für den Fluiddruck im Grubengebäude von geringer Bedeutung.

## 2.10 Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen entstehen durch mineralogische Umwandlungen (z. B. Anhydrit  $\leftrightarrow$  Gips), chemische Prozesse (z. B. Korrosion von Metallen) bzw. materialspezifische Eigenschaften bei Feuchtigkeitsaufnahme oder -abgabe sowie durch Setzung und Kompaktion.

Das FEP kann die Initial-Barriere „Streckenverschlüsse“, „Schachtverschlüsse“ und „Wirtsgestein“ beeinträchtigen.

Unter der Ausprägung des FEP wird neben der Volumenänderung der Baustoffe (in  $m^3$ ) vor allem der Quelldruck des Materials (in MPa) verstanden. Da sich die Volumenänderungen der Materialien aus einer Vielzahl von Einflussfaktoren ergeben, müssen sie durch Modellrechnungen ermittelt werden. Im Folgenden werden daher nur die relevanten Einflüsse qualitativ dargestellt.

Variante B1: Wichtig sind die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen vor allem im Hinblick auf die Funktion der Verschlussbauwerke. Außerdem beeinflussen sie die Hohlraumvolumina und damit die Volumina in den Grubenbauen, die als Speicher- oder Transportpfade für Fluide zur Verfügung stehen.

In beiden Schächten wird das obere Schachtdichtelement aus Ca-Bentonit erstellt. Das gleichmäßige Quellen des Bentonits ist Voraussetzung für die Funktion der Dichtelemente. Die Aufsättigung wird durch Wegsamkeiten wie die Auflockerungszone und Risse sowie durch den Fluidruck beeinflusst. Gleichzeitig wird das Dichtelement aufgrund der Gebirgsspannungen durch die Konvergenz eingespannt. Der vorgesehene Ca-Bentonit wird bei der Aufsättigung mit Wasser einen Quelldruck von ca. 1 MPa entwickeln und beeinträchtigt daher die Integrität des angrenzenden Gebirges nicht. Das *Quellen des Bentonits* wird durch den Chemismus der zutretenden Deckgebirgslösungen beeinflusst. Ungünstig könnten sich Zement-Auslaugungsprodukte in den Lösungen auf das Quellvermögen des Bentonits auswirken.

Salz- und Sorelbetone zeigen nach dem Abbinden ein leichtes Schrumpfen, das nur während der Errichtung in der Betriebsphase auftritt und daher hier nicht relevant ist. Bei einer Durchströmung der Betone mit Lösungen kommt es zu einem leichten Quellen. Da der Chemismus der Betonelemente dem beobachteten Lösungsschemismus sowie erwarteten Lösungsalterationen angepasst wird, ist eine Alteration der Ver-

schlüsse nur in geringem Umfang zu unterstellen. Falls es trotzdem zu einer Alteration (Korrosion, Auflösung / Ausfällung) der Verschlussbauwerke kommt, so führen die Korrosionsprodukte zu einer weiteren Volumenzunahme.

Beton wird außerdem für selbstabschirmende Behälter für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle und als Abfallmatrix verwendet (Variante A).

Ein Teil der Widerlager der Schachtverschlüsse sowie der Versatz des Infrastrukturbereiches bestehen aus Basalt- / Serpentinitschotter, der sich nach der Einbringung setzt. Bei den Widerlagern wird die Setzung durch ein Verdichten bei der Einbringung so weit begrenzt, dass es nicht zu einem Konturabriss der Dichtelemente kommen kann. Zu nachträglichen Setzungen kann es kommen, falls ein Lösungszutritt zu Auslaugungen des Wirtsgesteins führt.

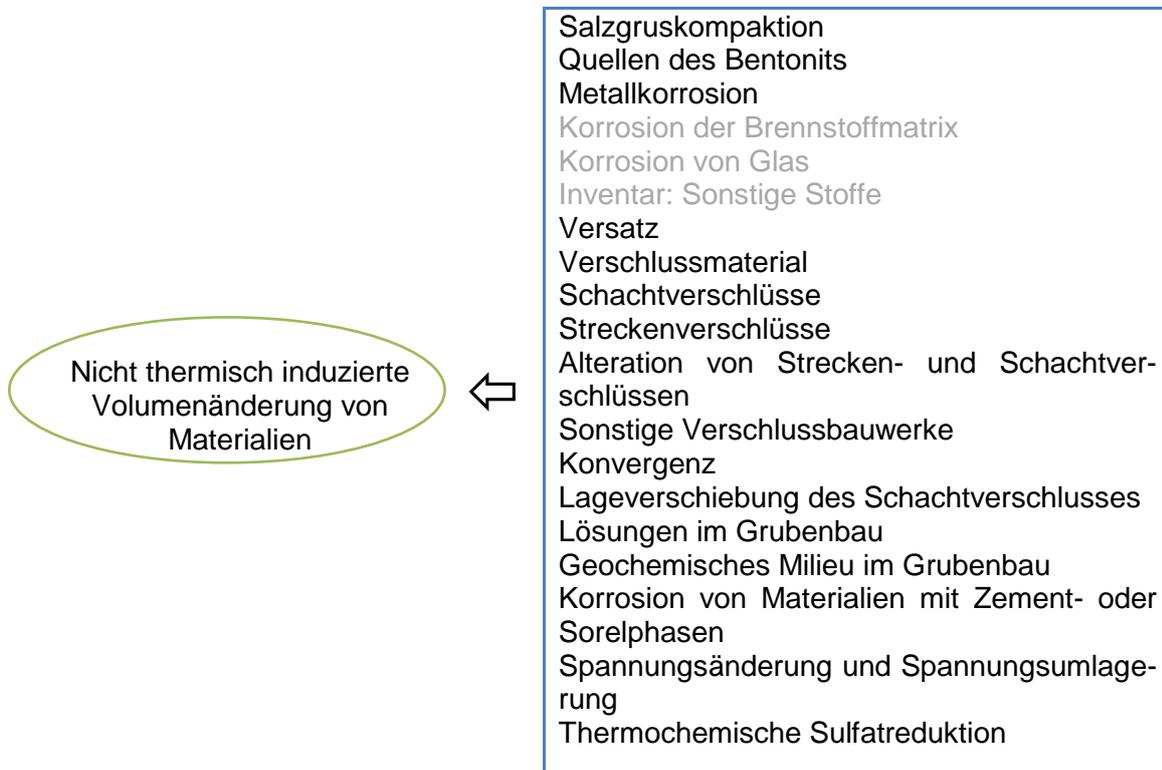
Die Volumenänderungen in den Verschlussbauwerken können bei entsprechender Einspannung den Spannungszustand des Gebirges beeinflussen und ggf. zu Rissbildungen führen. Eine lokale Beeinträchtigung der Gebirgsintegrität durch Rissbildung könnte auch bei Vergipsungsprozessen in einer Anhydritscholle nach einem Lösungszutritt bzw. durch die Volumenzunahme infolge *Thermochemischer Sulfatreduktion* auftreten.

Bei der *Metallkorrosion* von Behältern und technischen Einrichtungen entstehen Oxide mit größerem Volumen. Außerdem wird Wasserstoffgas gebildet, das die Entwicklung des geochemischen Milieus beeinflusst und den Fluiddruck erhöht.

Da im Referenzszenarium im Grubengebäude nur geringe Mengen Restfeuchtigkeit vorhanden sind, sind aufgrund der dadurch initiierten Volumenänderungen der Materialien nur geringe Auswirkungen auf die Systementwicklung zu erwarten.

Variante B2: Nur in drei Fällen werden signifikante Abweichungen bezüglich der Volumenänderungen von Materialien im Vergleich zur Variante B1 erwartet: Zum einen ändert sich aufgrund der Endlagerkonfiguration die Menge an einzubringendem Salzgrus, zum anderen wird aufgrund des abweichenden Behältermaterials die Metallkorrosion anders ablaufen. Aufgrund der etwas höheren Restfeuchte in den CASTOR-Behältern wird auch die Korrosion der Brennstoffmatrix etwas intensiver sein als in der Variante B1.

Infolge geänderter Stoffinventare im Nahfeld wird das geochemische Milieu im Nahfeld abweichen. Die Auswirkungen auf die Korrosion der Dichtpfropfen sind zu prüfen. Außerdem ist zu untersuchen, ob die *Thermochemische Sulfatreduktion* aufgrund des geänderten Temperaturfeldes auch andere Bereiche des Wirtsgesteins betrifft. Die Ausprägung aller anderen FEP entspricht der Variante B1.



**Abb. 2.10** Einflussfaktoren auf die Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Variante C: Von einer nicht thermisch induzierten Volumenänderung betroffenen Materialien ergeben sich wahrscheinlich nur in vier Fällen signifikante Abweichungen für die Variante C.

Zum einen verringert sich aufgrund der Endlagerkonfiguration die Menge an einzubringendem feuchten Salzgrus (123.000 m<sup>3</sup> statt 210.000 m<sup>3</sup> in der Variante B1), zum anderen wird aufgrund der Bohrlochverrohrungen und der abweichenden Behältermaterialien die Metallkorrosion im Nahfeld anders ablaufen. Wichtig ist hierfür die Restfeuchte in den Behältern und in der Sandverfüllung.

Infolge geänderter Stoffinventare wird auch das geochemische Milieu im Nahfeld abweichen. Die Auswirkungen auf die Korrosion der Bohrlochverschlusspfropfen und die Dichtpfropfen sind zu prüfen.

Die *Thermochemische Sulfatreduktion* wird aufgrund des unterschiedlichen Temperaturfeldes auch andere Bereiche des Wirtsgesteins sowie die Bohrlochverschlusspfropfen und die Dichtpfropfen betreffen. Die Ausprägung aller anderen FEP entspricht der Variante B1.

## 2.10.1 Auslösende FEP

### 2.10.1.1 Salzgruskompaktion

Die Salzgruskompaktion führt zu einer Volumenabnahme. Somit wird der Stützdruck auf das Gebirge geringer.

Variante B1: Die materialspezifischen Eigenschaften des Versatzes bestimmen Art und Umfang der Kompaktion. Die Eigenschaften der Behälter und technischen Einrichtungen sowie Konvergenz und Spannungsverhältnisse im Versatz beeinflussen den Ablauf der Kompaktion. Durch Lösungen im Grubenbau wird das Kriechverhalten von Salz erhöht und die Salzgruskompaktion beschleunigt.

Variante B2: Die Brennelementbehälter und Sonstigen Endlagerbehälter, die Versatzmengen, die technischen Einrichtungen (Nahfeld), die Konvergenz, der Fluiddruck, die Lösungsmengen und die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen werden in der Variante B2 anders ausgebildet sein.

**Tab. 2.49** Beeinflussende FEP für das FEP *Salzgruskompaktion*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Konvergenz*
Brennelement-Behälter	Fluiddruck
Sonstige Endlagerbehälter	Lösungen im Grubenbau*
Versatz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Die Versatzmengen, (geringere Mengen an feuchtem und trockenem Salzgrus) die *Konvergenz*, der *Fluiddruck*, die Lösungsmengen (Restfeuchte in den Behältern und in der Sandverfüllung) und die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen werden in der Variante C anders ausgebildet sein. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.10.1.2 Quellen des Bentonits

Das *Quellen des Bentonits* ist eine nicht thermisch induzierte Volumenänderung, die aufgrund ihrer besonderen Bedeutung in einem separaten FEP behandelt wird. Vom *Quellen des Bentonits* hängt die Funktion der oberen Dichtelemente in den Schachtverschlüssen ab.

Variante B1: Das *Quellen des Bentonits* ist Voraussetzung für die Funktion der oberen Dichtelemente in den Schachtverschlüssen. Es wird durch *Lösungen im Grubenbau* ausgelöst. Die Intensität des *Quellens des Bentonits* hängt vom verwendeten *Verschlussmaterial* und vom Design des *Schachtverschlusses* ab. Es kann durch eine *Alteration der Schachtverschlüsse* (Rekristallisation des Bentonits) beeinträchtigt werden.

Das *Quellen des Bentonits* in den Dichtelementen wirkt unmittelbar auf die Schachtwandung ein und reduziert hier durch einen Stützdruck die *Konvergenz*.

Bei einer *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* können neue Wegsamkeiten entstehen und es kann zum erneuten *Quellen des Bentonits* kommen.

*Lösungszutritte ins Grubengebäude* können in Abhängigkeit vom Chemismus der Wässer zu einem unterschiedlichen *Quellen des Bentonits* führen. So verlieren Bentonite einen Teil ihres Quellpotenzials mit zunehmender Salinität des durchströmenden Fluids. Das *Geochemische Milieu im Grubenbau* ist daher von großer Bedeutung für das Bentonitquellen.

Die *Auflockerungszone* an der Schachtkontur stellt bei der Errichtung des Bentonit-Dichtelementes eine Wasserwegsamkeit dar, die zur Aufsättigung und zum *Quellen des Bentonits* beiträgt. *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im umgebenden Salzgebirge wirkt sich auf das *Quellen des Bentonits* aus.

**Tab. 2.50** Beeinflussende FEP für das FEP *Quellen des Bentonits*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Kanalisation in Dichtelementen
Lösungen im Grubenbau*	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Verschlussmaterial*	Lösungszutritt ins Grubengebäude
Schachtverschlüsse*	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B2 und C: Die aufgrund der Endlagerkonfiguration unterschiedlichen Temperatur- und Spannungsverhältnisse werden sich durch die Spannungen und die Konvergenz auch im Schacht auswirken. Die Relevanz für das Quellen des Bentonits wird aber gering sein.

### 2.10.1.3 Metallkorrosion

Die bei der *Metallkorrosion* entstehenden Oxide weisen ein größeres Volumen als der Ausgangsstoff auf. Entsprechend der großen Metallmengen im Endlager und der mit der Korrosion verbundenen *Gasbildung* hat die *Metallkorrosion* einen Einfluss auf die Entwicklung des Endlagersystems, während Matrix- und Glaskorrosion im Hinblick auf die Volumenzunahme von untergeordneter Bedeutung sind.

Variante B1: Wesentliche Voraussetzungen für das Auftreten von *Metallkorrosion* sind die Verfügbarkeit von Lösungen (*Lösungen im Grubenbau*) und ein entsprechendes *Geochemisches Milieu im Grubenbau*. Während in den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle nur geringe Lösungsmengen zu unterstellen sind (Restfeuchte in den Behältern, Versatzfeuchte und Fluid Inclusions), werden in die Einlagerungsbereiche für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle größere Wassermengen mit den Abfallgebinden eingebracht. Hier wird die *Metallkorrosion* daher auch eine größere Rolle spielen.

Ausgangsmaterialien für die Metallkorrosion liefern die *Endlagerbehälter*, metallische *Abfallmatrices* sowie *Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften*. Bei entsprechender Intensität kann die Korrosion auch zum *Versagen eines Brennelement-*

*Behälter* führen. Der Korrosionsablauf kann durch die Prozesse *Auflösung und Ausfällung* modifiziert werden (z. B. Krustenbildungen, die den Korrosionsfortschritt hemmen). Da die Korrosionsprozesse außerdem temperaturabhängig sind, werden sie durch die *Wärmeproduktion* der eingelagerten radioaktiven Abfälle beeinflusst. *Diffusion* steuert das Fortschreiten der Metallkorrosion.

Variante B2: Das FEP *Metallkorrosion* beschreibt vor allem Prozesse im Nahfeld, in dem spezifische Unterschiede zwischen den Varianten B2 und Variante B1 auftreten. Wichtig sind vor allem abweichende *Lösungen im Grubenbau* (im Salzgrus und in den Behältern), Änderungen des *Geochemischen Milieus im Grubenbau* und abweichende Materialien für Endlagerbehälter und technische Einrichtungen.

Variante C: Bei der Variante C ergeben sich durch die abweichenden Lösungsmengen (im Salzgrus, in der Sandverfüllung und im Behälter), Änderungen des *Geochemischen Milieus im Grubenbau*, die *Bohrlochverrohrung* und abweichende Behältermaterialien Differenzen bei der Ausprägung der Metallkorrosion im Vergleich zur Variante B1.

**Tab. 2.51** Beeinflussende FEP für das FEP *Metallkorrosion*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Metalle	Bohrlochverrohrung
Abfallmatrix	Lösungen im Grubenbau*
Brennelement-Behälter	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Sonstige Endlagerbehälter	Auflösung und Ausfällung
Versagen eines Brennelement-Behälters	Wärmeproduktion
Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters	Diffusion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

## 2.10.2 Beeinflussende FEP

### 2.10.2.1 Versatz

Der Versatz (Sand, Schotter, Salzgrus) wird zur Ausfüllung untertägiger Hohlräume ins Bergwerk eingebracht. Die Eigenschaften des Versatzes bestimmen dessen Verhalten

gegenüber chemischen, thermischen, hydraulischen, mechanischen und anderen physikalischen Einwirkungen.

**Tab. 2.52** Beeinflussende FEP für das FEP Versatz

Beeinflussende FEP	Mikrobielle Prozesse im Gruben- gebäude und im Salzgebirge
Konvergenz*	Wärmeproduktion
Salzgruskompaktion*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumen- änderung von Materialien	Verdampfen von Wasser
Lösungen im Grubenbau*	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Kanalisation im Salzgrus	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Thermochemische Sulfatreduktion*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die *Konvergenz* beeinflusst die Setzung des Versatzes (z. B. Schotter). Die *Salzgruskompaktion* ändert die Eigenschaften (Festigkeit, Porosität) des Salzgrus. Bei einer ungleichmäßigen Kompaktion kann es zur Ausbildung von Strömungskanälen (*Kanalisation im Salzgrus*) kommen. Die Versatzeigenschaften (z. B. das Kriechvermögen) werden durch die *Lösungen im Grubenbau* beeinflusst.

Eine Setzung der Schotter im Infrastrukturbereich (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*) ändert deren Eigenschaften (Porosität, Permeabilität, mechanische Eigenschaften). Weiterhin haben die Prozesse *Auflösung und Ausfällung* Einfluss auf die Zusammensetzung (Lösung von Versatzkomponenten) und die Eigenschaften des Versatzes (Verringerte Porosität / Permeabilität durch Ausfällungen im Porenraum).

Die Wärme aus den Abfällen führt zu einer thermischen Expansion oder Kontraktion der Versatzmaterialien und hat Einfluss auf die Kriechfähigkeit des Salzgrus. Verdampfen von Wasser reduziert die Feuchtigkeit im Versatz, was wiederum Einfluss auf die Kriechfähigkeit des Salzgruses hat.

Durch *Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude* und im Wirtsgestein sowie durch die *Thermochemische Sulfatreduktion* kann das Sulfat im Salzgrus umgewandelt werden.

Varianten B2 und C: Die *Konvergenz* und die mit ihr verknüpfte *Salzgruskompaktion*, die *Lösungen im Grubenbau* (abweichenden Mengen feuchter Salzgrus und in der Variante C Sandverfüllung mit Restfeuchte in den Bohrlöchern), die *Wärmeproduktion* und die *Thermische Expansion oder Kontraktion* werden in den Varianten anders ausgebildet sein als in der Variante B1. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.10.2.2 Verschlussmaterial

Das Quellvermögen gehört zu den materialspezifischen Eigenschaften verschiedener Verschlussmaterialien (z. B. der Betone).

Variante B1: Es kann unterstellt werden, dass kaltzeitliche Einflüsse, wie eine tiefreichende Erosion durch glaziale Rinnenbildung, das obere Dichtelement der Schachtverschlüsse beeinträchtigen und durch die Schaffung neuer Wegsamkeiten den nicht thermisch induzierten Volumenänderungen Vorschub leisten. Bei einer starken Abkühlung (*Permafrost*) wird auch das *Quellen des Bentonits* beeinträchtigt. Doch wird eine derartige Einwirkung erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse auftreten.

Die bei der *Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse* mobilisierten Stoffe können das Quellvermögen des Bentonits beeinträchtigen. Durch die Alteration geschaffene Wegsamkeiten in den Barrieren können das Quellen des Betons begünstigen.

Die Konvergenz des Gebirges wirkt den quellenden Verschlussmaterialien entgegen. Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie Spannungen im Verschlussbauwerk beeinflussen die Eigenschaften der Verschlussmaterialien.

*Auflösung und Ausfällung* sowie die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* verändern die mechanischen (und hydraulischen) Eigenschaften des Verschlussmaterials.

Varianten B2 und C: Die *Konvergenz*, die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Gebirge werden in den Varianten anders ausgebildet sein. Diese Einflüsse stellen Lastannahmen bei der Auslegung der Barrieren /MÜL 12a/ dar und werden deshalb deren Funktion nicht beein-

trächtigen /MÜL 12a/. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.53** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

Beeinflussende FEP	
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflösung und Ausfällung
Konvergenz*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Thermische Expansion oder Kontraktion
Quellen des Bentonits*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Permafrost	Glaziale Rinnenbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.10.2.3 Schachtverschlüsse

Das Design der Schachtverschlüsse /MÜL 12a/ beeinflusst Ablauf und Intensität des Materialquellens bzw. der Setzung und Kompaktion der Materialien.

Variante B1: Durch ein *Erdbeben* oder den Salzaufstieg (*Diapirismus*), der zu einer *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* führt, bzw. durch *Glaziale Rinnenbildungen* können Risse in den Bauwerken entstehen, die nach einem Lösungszutritt ein Quellen des Baumaterials begünstigen.

Die Eigenschaften der Schachtverschlüsse werden durch die *Verschlussmaterialien* und deren Quellvermögen bestimmt. Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* der Verschlussmaterialien, die Spannungen im Verschlussbauwerk sowie die *Konvergenz* wirken auf die Schachtverschlüsse und beeinflussen so auch die Volumenänderungen der Baumaterialien.

Der Fluiddruck beeinflusst die Aufsättigung der Baumaterialien und somit auch deren Quellen. Als anfänglicher Lösungspfad beeinflusst die *Auflockerungszone* die Aufsättigung der Baumaterialien. Sie wird sich mit dem Auflaufen des Gebirges auf die Verschlüsse weitgehend schließen.

**Tab. 2.54** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Diapirismus	Lageverschiebung eines Schachtverschlusses*
Subrosion	Kanalisation in Dichtelementen
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits*
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B2 und C: Die *Konvergenz*, der *Fluiddruck*, die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie die Spannungsverhältnisse werden in den Varianten anders ausgebildet sein. Sie stellen Lastannahmen bei der Auslegung der Barrieren dar und werden deshalb deren Funktion nicht beeinträchtigen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### 2.10.2.4 Streckenverschlüsse

Das Design der Streckenverschlüsse /MÜL 12a/ beeinflusst Ablauf und Intensität des Materialquellens bzw. der Setzung und Kompaktion der Materialien.

**Tab. 2.55** Beeinflussende FEP für das FEP *Streckenverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Diapirismus	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Alle Varianten: Die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung sind – abgesehen von den Schacht-spezifischen FEP (*Subrosion, Glaziale Rinnenbildung, Lageverschiebung des Schachtverschlusses, Quellen des Bentonits*) – identisch mit dem FEP *Schachtverschlüsse* (s. o.).

#### 2.10.2.5 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Bei der Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen entstehende Umwandlungsprodukte können ebenfalls zu einer Volumenzunahme führen bzw. ihre Alterationsprodukte können das Quellvermögen anderer Stoffe (z. B. des Bentonits) beeinflussen.

Variante B1: Durch eine Alteration können die mineralogisch-chemischen und hydraulischen Eigenschaften der Verschlüsse beeinträchtigt werden. Um die chemische Stabilität der Barrieren über die vorgesehene Funktionsdauer zu gewährleisten, wurden *Verschlussmaterialien* sowie konstruktive Eigenschaften der Verschlüsse entsprechend dem aktuell beobachteten Chemismus der Lösungen im Wirtsgestein und Deckgebirge gewählt /MÜL 12a/.

Das *Geochemische Milieu im Grubenbau* und die *Hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge* sind wichtige Randbedingungen, die Art und Umfang der Alteration beeinflussen. Die *Auflösung und Ausfällung* sowie die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* sind Teilaspekte der Alteration.

Der Stofftransport durch die Barriere erfolgt über *Diffusion*. Da für das Referenzszenarium unterstellt wird, dass sich die Auflockerungszone in der vorgesehenen Weise schließt, werden auch für den Stofftransport am Kontakt Barriere – Gebirge diffusive Prozesse unterstellt. Ein advektiver Stofftransport ist weniger wahrscheinlich. Diese Stofftransportprozesse können auch zur Alteration der Barrieren beitragen.

Varianten B2 und C: Für diese Varianten ist im Nahfeld aufgrund anderer Behälter, technischer Einrichtungen und Verfüllmaterialien ein leicht abweichendes geochemisches Milieu zu erwarten. Dies wird aber keine Auswirkung auf die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse haben. Eine Aussage, ob und auf welche Weise sich die abweichenden Spannungs- und Temperaturverhältnisse auf die Alteration auswirken, kann allein auf der Basis von Plausibilitätsbetrachtungen nicht erfolgen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.56** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Streckenverschlüsse*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Auflockerungszone
Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Advektion
Lageverschiebung des Schachtverschlusses*	Diffusion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.10.2.6 Sonstige Verschlussbauwerke

Das Design der *Sonstigen Verschlussbauwerke* beeinflusst den Ablauf und die Intensität des Materialquellens bzw. der Setzung und Kompaktion der Materialien.

Für die Varianten B1 und B2 sind nur die Dichtpfropfen zu betrachten, für die Variante C zusätzlich die Bohrlochverschlusspfropfen.

Varianten B1 und B2: Die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung sind – abgesehen von den Streckenverschluss-spezifischen FEP – weitgehend identisch mit dem FEP *Streckenverschlüsse* (s. o.). Aufgrund der Nähe zu den Einlagerungsstrecken und den daraus resultierenden hohen Temperaturen nach der Einlagerung ist hier aber auch eine Beeinflussung durch die *Thermochemische Sulfatreduktion* möglich.

**Tab. 2.57** Beeinflussende FEP für das FEP *Sonstige Verschlussbauwerke*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Ausfall eines Dichtpfropfens
Diapirismus	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*
Bohrlochverrohrung	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck	Thermochemische Sulfatreduktion*
Thermische Expansion oder Kontraktion	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante C: Für die Dichtpfropfen und die Bohrlochverschlusspfropfen sind die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung weitgehend identisch mit dem FEP *Streckenverschlüsse* (s. o.). Der einzige Unterschied ist die mögliche Beeinflussung der Dichtpfropfen und Bohrlochverschlusspfropfen durch die *Thermochemische Sulfatreduktion*, die sich aus der Aufheizung durch die Nähe zu den Einlagerungsbohrlöchern ergibt.

### 2.10.2.7 Konvergenz

Die Konvergenz überträgt den Gebirgsdruck auf die Verschlussbauwerke und wirkt dem Quellen der Baumaterialien entgegen.

Variante B1: Der Stützdruck, der auf die Grubenraumkontur ausgeübt wird, und die resultierende Konvergenzentwicklung hängen von den mechanischen Eigenschaften des lokal unterschiedlichen *Versatz- und Verschlussmaterials* sowie der *Strecken- und*

*Schachtverschlüsse* sowie der *Sonstigen Verschlussbauwerke* ab. Bei einer Alteration der Verschlüsse können die Steifigkeitseigenschaften reduziert sein, was den Stützdruck und damit die *Konvergenz* beeinflusst.

Veränderungen des *Fluiddrucks* führen zu Spannungsänderungen im Salinar (z. B. Hohlrauminnendruck) und damit zu einer Beeinflussung des Konvergenzprozesses. Mit der Kompaktion des Salzgrusversatzes ändern sich dessen mechanische Eigenschaften und es baut sich ein Stützdruck auf, der die Konvergenz behindert. Die Zusammensetzung des Salinars (z. B. Verunreinigungen) beeinflusst das Konvergenzverhalten des Wirtsgesteins. Spannungsänderungen und Konvergenz stehen in enger Wechselwirkung.

**Tab. 2.58** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*

Beeinflussende FEP	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Sonstige Stoffe*	Bohrlochverrohrung
Versatz*	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial*	Fluiddruck
Schachtverschlüsse*	Salzgruskompaktion*
Streckenverschlüsse*	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Wirtsgestein
Sonstige Verschlussbauwerke*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B2 und C: Der *Versatz* (Versatzmengen), der *Fluiddruck*, die *Salzgruskompaktion* sowie die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Gebirge werden in der Variante B2 anders ausgebildet sein. Diese Rahmenbedingungen haben auch Auswirkung auf die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.10.2.8 Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Eine Lageverschiebung des Schachtverschluss kann zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit und damit zu einem verstärkten Quellen von Baustoffen führen.

Durch die geänderten thermischen und mechanischen Einflüsse der verschiedenen Varianten sind Abweichungen bezüglich der Lageverschiebung des Schachtverschlusses denkbar.

**Tab. 2.59** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*

<b>Auslösende FEP</b>	Konvergenz*
Diapirismus	Fluiddruck
Thermische Expansion oder Kontraktion	Sonstige Verschlussbauwerke
<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Verschlussmaterial*	Quellen des Bentonits*
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der *Diapirismus* und die *Thermische Expansion oder Kontraktion* führen unmittelbar zu Lageverschiebungen des Schachtverschlusses.

Ein *Erdbeben* kann die Integrität der Widerlager beeinträchtigen, so dass es dann zu Lageverschiebungen des Schachtverschlusses kommen kann.

Das für die Schottersäule und die Widerlager verwendete *Verschlussmaterial* und das Barrierendesign sind entscheidend für die Langzeitstabilität und die Funktionalität des Schachtverschlusses. Infolge einer Alteration des Schachtverschlusses kann es zu Sackungen und zu einer Lageverschiebung kommen.

Die *Konvergenz*, die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* und das *Quellen des Bentonits* tragen zu einer Einspannung des Schachtverschlusses im Schacht und damit zur Stabilität des Schachtverschlusses bei. Falls einer dieser Prozesse die vorgesehene Größenordnung über- oder unterschreitet, kann es zu einer Lageverschiebung des Schachtverschlusses kommen.

Bei einem Zutritt teilgesättigter Deckgebirgslösungen kann es zu Auslaugungen (*Auflösung und Ausfällung*) im Salzgebirge sowie in den Betonelementen kommen, die die Stabilität des Schachtverschlusses beeinträchtigen.

Falls sich die Spannungsverhältnisse im Gebirge ändern (z. B. asymmetrische Spannungsverteilung), so könnten ebenfalls Lageverschiebungen des Schachtverschlusses resultieren.

Varianten B2 und C: Die Unterschiede der *Konvergenz*, des *Fluiddrucks* sowie der Spannungsverhältnisse werden im Bereich der Schächte im Vergleich zur Variante B1 nur gering sein und zu keiner abweichenden Ausprägung des FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* führen.

#### **2.10.2.9 Lösungen im Grubenbau**

Die Lösungen im Grubengebäude führen zu einer Aufsättigung der Baumaterialien mit Lösung und initiieren damit eine Volumenzunahme durch Aufquellen.

Aufgrund der geänderten Endlagerkonfiguration ändern sich die benötigten Mengen an feuchtem Salzgrus in den verschiedenen Varianten, die maßgeblich zur Lösungsmenge im Endlager beitragen. In der Variante C kommt noch die Restfeuchte in der Sandverfüllung der Einlagerungsbohrlöcher hinzu. Von geringerer Bedeutung ist die unterschiedliche Restfeuchte in den verschiedenen Behältertypen.

Variante B1: Ein *Lösungszutritt ins Grubengebäude* über die Schächte oder aus dem Wirtsgestein würde die Lösungsmengen im Grubengebäude erhöhen.

Außerdem werden mit dem *Versatz*, zementhaltigen *Verschlussmaterialien* sowie den Gebinden für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle Lösungen in das Grubengebäude eingebracht. Strömungsprozesse bewegen Lösungen in einem Grubenbau. Die Eigenschaften von Lösungen (z. B. Viskosität) sind von der Temperatur (*Wärmeproduktion*) und dem *Geochemischen Milieu im Grubenbau* abhängig.

*Auflösung und Ausfällung*, Korrosionsprozesse, *Zersetzung von Organika*, *Verdampfen von Wasser* und *Radiolyse* sind Prozesse, die die Lösungsmenge reduzieren. Bei der *Thermochemischen Sulfatreduktion* wird Wasser gebildet.

**Tab. 2.60** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lösungen im Grubenbau*

<b>Auslösende FEP</b>	Auflösung und Ausfällung
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Metallkorrosion*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Korrosion der Brennstoffmatrix
Inventar: Sonstige Stoffe*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*
Abfallmatrix	Zersetzung von Organika
Versatz*	Wärmeproduktion
Verschlussmaterial*	Verdampfen von Wasser
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Radiolyse
Geochemisches Milieu im Grubenbau*	Thermochemische Sulfatreduktion*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B2: Die Lösungsmengen im Nahfeld ändern sich durch die etwas höhere Restfeuchte in den CASTOR-Behältern, aber durch die geringere Behälteranzahl und durch die Verwendung von trockenem Salzgrus für die Verfüllung wird die Gesamtlösungsmenge gegenüber der Variante B1 nicht sehr verschieden sein. Die Änderung des *Geochemischen Milieus im Grubenbau* gilt nur für das Nahfeld und wirkt sich auf die Korrosionsprozesse aus. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Die Lösungsmengen im Nahfeld ändern sich durch die Restfeuchte in den BSK und in der Sandverfüllung, in den Strecken durch die anderen Mengen feuchten Salzgrus. Die Änderungen des *Geochemischen Milieus im Grubenbau* können eine *Auflösung und Ausfällung* oder Korrosion metallischer oder zementhaltiger Stoffe beeinflussen. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### 2.10.2.10 Geochemisches Milieu im Grubenbau

Vom geochemischen Milieu im Grubenbau hängt es ab, ob es zu einer Volumenzunahme durch Baustoffquellen kommt.

Das geochemische Milieu variiert im Nahfeld der verschiedenen Varianten aufgrund der unterschiedlichen Behälter, technischen Einrichtungen und Verfüllmaterialien.

**Tab. 2.61** Beeinflussende FEP für das FEP *Geochemisches Milieu im Grubenbau*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Korrosion der Brennstoffmatrix
Inventar: Metalle	Korrosion von Glas*
Inventar: Organika	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*
Inventar: Sonstige Stoffe*	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Zersetzung von Organika
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Lösungen im Grubenbau*	Wärmeproduktion
Auflösung und Ausfällung	Gasmenge im Grubenbau
Metallkorrosion*	Radiolyse
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Advektion
Thermochemische Sulfatreduktion*	Diffusion
Komplexbildung	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die mit den Abfällen und den Bauwerken eingebrachten Festphasen, Lösungen und Gase sowie die Eigenschaften des Wirtsgesteins (z. B. *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*) bestimmen das geochemische Milieu und beeinflussen darüber hinaus auch das Quellvermögen der Baustoffe. Außerdem wird das geochemische Milieu durch die Alterationsprozesse der Materialien beeinflusst (*Auflösung und Ausfällung*, Korrosionsprozesse).

Von geringerer Bedeutung für das geochemische Milieu sind *Mikrobielle Prozesse im Grubenbau*, *Radiolyse*, *Thermochemische Sulfatreduktion* und *Komplexbildung*.

Der Ablauf der meisten geochemischen Reaktionen ist temperaturabhängig und wird daher durch die *Wärmeproduktion* der eingebrachten Abfälle beeinflusst.

Durch Advektion und Diffusion können die Stoffkonzentrationen und damit das geochemische Milieu verändert werden.

Varianten B2 und C: Die Änderungen des geochemischen Milieus ergeben sich in erster Linie durch die geänderten Inventare und deren Alteration bzw. Korrosion. Zudem

spielen die andere Restfeuchte in den Behältern und die Wärmeproduktion eine Rolle. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### **2.10.2.11 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen**

Die bei der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen entstehenden Umwandlungsprodukte zeichnen sich durch eine leichte Volumenzunahme gegenüber dem Ursprungsstoff aus.

Da die Änderungen des geochemischen Milieus in den Varianten B2 und C nur das Nahfeld betreffen, können Auswirkungen auf die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* am ehesten bei den Dichtpfropfen und Bohrlochpfropfen erwartet werden.

Variante B1: Zement wird in das Endlagerbergwerk über die Abfallmatrix, als selbstabschirmende Betonbehälter, als Verschlussmaterial sowie als Bohrlochverfüllung eingebracht.

Wichtige Randbedingungen für die Korrosionsprozesse sind das *Geochemische Milieu im Grubenbau*, *Lösungen im Grubenbau* sowie die *Wärmeproduktion* durch die Abfälle.

*Auflösung und Ausfällung* sind wichtige Teilprozesse bei der *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*. Da Wasser eine Komponente des Zements der *Abfallmatrix* und Betonbehälter ist, kann *Radiolyse* bei den Gebinden für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle eine Rolle spielen (Variante A).

Die *Diffusion* kann zur Durchmischung von Lösungen führen und so das Ausmaß der Zementkorrosion bestimmen.

Varianten B2 und C: Für die Korrosion sind Änderungen des *Geochemischen Milieus im Grubenbau* aufgrund eines abweichenden Inventars sowie andere Restfeuchte der Behälter relevant. Alle anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.62** Beeinflussende FEP für das FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*

Beeinflussende FEP	
Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	Lösungen im Grubenbau*
Inventar: Sonstige Stoffe*	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Abfallmatrix	Auflösung und Ausfällung
Sonstige Endlagerbehälter	Wärmeproduktion
Ausfall eines Sonstigen Endlagerbehälters	Radiolyse
Verschlussmaterial*	Diffusion
Sonstige Verschlussbauwerke*	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.10.2.12 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Die Spannungen im umgebenden Gebirge können dem Quellen der Baustoffe entgegenwirken.

Variante B1: *Erdbeben* können Spannungskonzentrationen insbesondere im Bereich von Materialien mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften induzieren. In ähnlicher Weise können sich durch Salzaufstieg (*Diapirismus*) im Bereich von Materialinhomogenitäten oder bei lokal unterschiedlichen Verformungsraten Spannungen im Wirtsgestein aufbauen.

Der Grundspannungszustand im Gebirge wird außerdem durch mechanische Auflast bzw. Entlastung durch die Eigenschaften des *Deck- und Nebengebirges*, durch eine Erhöhung der Schichtmächtigkeiten durch *Sedimentation* (z. B. während einer Kaltzeit oder während einer Transgression), durch eine Meeresüberflutung infolge einer *Transgression oder Regression* (bei einer Warmzeit / Kaltzeit), durch die Gletscherauflast bei einer *Vollständigen Inlandvereisung* oder durch eine Reduzierung der Deckgebirgsmächtigkeit durch Erosion infolge *Glazialer Rinnenbildung* verändert und wirkt sich so auf die *Konvergenz* aus.

**Tab. 2.63** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Verschlussmaterial*
Erdbeben	Schachtverschlüsse*
Sedimentation	Streckenverschlüsse*
Diapirismus	Sonstige Verschlussbauwerke*
Transgression oder Regression	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Inlandvereisung in randlicher Lage	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Ausfall eines Dichtpfropfens
Glaziale Rinnenbildung	Konvergenz*
Thermische Expansion oder Kontraktion	Fluiddruck
<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Brennelement-Behälter	Salzgruskompaktion*
Sonstige Endlagerbehälter	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Versatz*	Quellen des Bentonits*
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Technische Eigenschaften und deren Eigenschaften	Thermochemische Sulfatreduktion*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Im Umfeld des Grubengebäudes wird die Gebirgsspannung durch die mechanischen Eigenschaften der Endlagerbehälter, durch die Steifigkeit des Versatzes (Grad der Salzgruskompaktion), des Verschlussmaterials und der Verschlussbauwerke beeinflusst. Dabei können ein Quellen eines Baumaterials zu einer Druckerhöhung und eine Setzung (z. B. einer Schottersäule) zu einer Druckerniedrigung führen. Die *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* würde lokal im betrachteten Verfüllabschnitt zu Steifigkeitsänderungen und damit zu *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* führen. Außerdem kann ein entsprechend hoher *Fluiddruck* einen Stützdruck auf das Gebirge ausüben und damit die Spannungsverhältnisse ändern.

Die Eigenschaften des *Wirtsgesteins* sowie des *Deck- und Nebengebirges* beeinflussen die Spannungsänderungs- bzw. Spannungsumlagerungsprozesse.

Varianten B2 und C: Die Spannungsverhältnisse im Gebirge werden entsprechend der anderen Grubenraumgeometrie und der abweichenden Temperaturverhältnisse anders ausgeprägt sein. Die Gebirgsspannungen wirken über die Konvergenz auf Verschlussbauwerke und den Versatz (Salzgruskompaktion). Umgekehrt erzeugen Verschlussbauwerke, kompaktierter Versatz und Fluiddruck einen Stützdruck, der dem Gebirgsdruck entgegen wirkt. Die anderen FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.10.2.13 Thermochemische Sulfatreduktion

Es handelt sich um eine Redoxreaktion von organischen Verbindungen oder molekularem Wasserstoff mit Sulfaten bei erhöhten Temperaturen unter Bildung von  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und teilweise  $\text{CO}_2$ . Die entstehenden Reaktionsprodukte zeichnen sich durch eine Volumenzunahme von 10 % /WEB 11/ gegenüber dem Ausgangsmaterial aus.

**Tab. 2.64** Beeinflussende FEP für das FEP *Thermochemische Sulfatreduktion*

Beeinflussende FEP	
Glaziale Rinnenbildung	Auflösung und Ausfällung
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*
Konvergenz*	Thermische Expansion und Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Kanalisation in Dichtelementen	Quellen des Bentonits*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

In den verschiedenen Einlagerungsvarianten werden entsprechend der unterschiedlichen Geometrie der Einlagerungsbereiche jeweils andere Gebirgsbereiche von einer *Thermochemischen Sulfatreduktion* betroffen sein.

Variante B1: Die Rahmenbedingungen für eine thermochemische Sulfatreduktion sind während der thermischen Phase am Standort Gorleben gegeben: Der mittlere Anhydritgehalt im Hauptsalz beträgt 2 – 8 Vol.-%, durch die Versatzfeuchte und die Fluid Inclusions sind geringe Lösungsmengen vorhanden, außerdem enthält das Hauptsalz geringe Mengen an Kohlenwasserstoffen (ca. 0,1 – 0,2 Vol.-%) und die Temperatur wird im Nahbereich der Einlagerungsfelder wenige 1000 Jahre über 80 °C liegen. Der

Prozess könnte außerdem durch Wasserstoff initiiert werden, der bei der Metallkorrosion entsteht.

Varianten B2 und C: Aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration ergibt sich ein geändertes Temperaturfeld, das eine wesentliche Randbedingung für die thermochemische Sulfatreduktion darstellt.

### **2.10.3 Nicht berücksichtigte FEP**

*Die Korrosion der Brennstoffmatrix, die Korrosion von Glas und das Inventar: Sonstige Stoffe* tragen nicht wesentlich zur Ausprägung des FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien* bei.

## 2.11 Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Mögliche Ursachen für eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses sind der Salzaufstieg (*Diapirismus*), eine *Expansion oder Kontraktion* des Gebirges infolge Aufheizung oder Abkühlung, Auslaugungen des Gebirges im Bereich des Schachtverschlusses (*Auflösung und Ausfällung*) sowie Beanspruchungen und Lasten durch die Dichtelemente, die die Stabilität der Widerlager überschreiten. Sicherheitsrelevant sind Lageverschiebungen eines Dichtelementes, die zu lokalen Abrissen an der Hohlraumkontur und so zu Umläufigkeiten führen, die die Barrierenwirkung dieses Dichtelementes beeinträchtigen.

Das FEP wirkt direkt auf die Funktion der Initial-Barriere „Schachtverschlüsse“ ein.

Die Ausprägung des FEP wird durch das Maß der Verschiebung und durch die daraus resultierende Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit beschrieben. Die Verschiebung kann in einigen Fällen bereits jetzt näherungsweise quantifiziert werden. Die dadurch hervorgerufene Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit ist durch Modellrechnungen zu ermitteln.

Variante B1: Die Schachtverschlüsse werden entsprechend dem Sicherheitserdbeben ausgelegt, so dass ein Erdbeben nicht zu Lageverschiebungen des Schachtverschlusses führen kann, die die Funktion des Schachtverschlusses beeinträchtigen. So werden die Setzungen der Schottersäule durch entsprechende technische Maßnahmen bei der Einbringung so weit begrenzt, dass es nicht zu stärkeren Lageverschiebungen eines Dichtelementes des Schachtverschlusses kommt. Lokale Abrisse an der Hohlraumkontur, die zu Umläufigkeiten und damit zu lokalen Fließwegen führen könnten, sind daher für das Referenzszenarium nicht zu unterstellen. Zudem liegt aufgrund der Redundanz der Dichtelemente beim Ausfall eines Dichtelementes noch kein Versagen des Schachtverschlusses vor.

Durch die Salzbewegungen infolge des Salzaufstiegs von 0,02 mm/a (*Diapirismus*) kann es während der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren zu Gebirgsbewegungen von 1,0 m und zu entsprechenden Lageverschiebungen der Schachtverschlüsse kommen. Die Schachtverschlüsse werden so ausgelegt, dass es bei derartigen Verschiebungen nicht zu einem Ausfall aller drei Dichtelemente kommen wird.

Außerdem berücksichtigt die Schachtauslegung den Chemismus der aktuellen Wirtsgesteins- und Deckgebirgslösungen, so dass es beim Referenzszenarium nur zu einer begrenzten *Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse* kommen wird, aus der sich keine relevante Lageverschiebung der Schachtverschlüsse ergeben wird.

Die heutigen Gebirgsspannungen sowie ihre Veränderung durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle (*Thermische Expansion oder Kontraktion*) wirken über die *Konvergenz* auf die Schachtverschlüsse. Durch das unterschiedliche Quellen sowie die Setzungen von Baustoffen ergeben sich weitere mechanische Lasten, die auf das Verschlussbauwerk wirken (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*). Außerdem wirken hydraulische Drücke über den *Fluiddruck* auf die Barrieren. Die genannten Lasten wurden bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt und werden daher beim Referenzszenarium auch nicht zu einer Lageverschiebung des Schachtverschlusses führen, die die Funktion der Barriere beeinträchtigt.

Die *Auflockerungszone* wird im Bereich der Dichtelemente so weit wie möglich entfernt und bei Bedarf durch zusätzliche Zementinjektionen stabilisiert und abgedichtet. Eine Lageverschiebung der Schachtverschlüsse aufgrund einer verminderten mechanischen Stabilität im Bereich der Auflockerungszone ist daher nicht zu unterstellen.

Lageverschiebungen durch Auslaugungen des Gebirges (*Auflösung und Ausfällung*) sind lediglich bei Standortentwicklungen mit dem Zutritt ungesättigter oder teilgesättigter Lösungen zu erwarten. Derartige Entwicklungen sind aber nicht für das Referenzszenarium zu unterstellen.

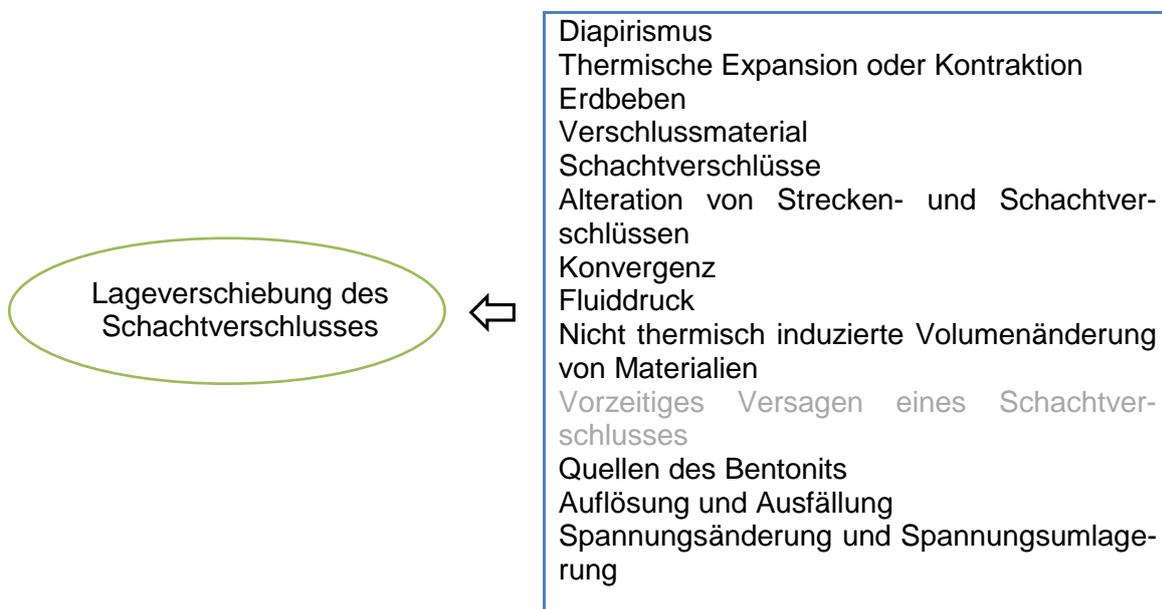
Mögliche kaltzeitliche Einflüsse, wie *Glaziale Rinnenbildungen*, sind nicht für die *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* relevant, da sie erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse auftreten.

Zusammenfassend sind beim Referenzszenarium für die Funktionsdauer der Schachtverschlüsse vor allem die Prozesse *Erdbeben*, *Salzaufstieg (Diapirismus)*, thermomechanische Spannungen und *Alteration der Schachtverschlüsse* im Hinblick auf eine Lageverschiebung der Schachtverschlüsse zu betrachten.

Varianten B2 und C: Die Änderungen der Randbedingungen für diese Varianten betreffen in erster Linie das Nahfeld. Weit reichende Auswirkungen der Endlagerkonfiguration umfassen thermische und mechanische Einflüsse. Falls sich signifikante Abwei-

chungen zur Variante B1 ergeben, so müssen diese Lasten bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt werden.

Relevante, durch die Endlagerkonfiguration veränderte FEP sind daher die *Wärmeproduktion*, die *Thermische Expansion oder Kontraktion*, *Spannungsänderungen* und *Spannungsumlagerungen* sowie die *Konvergenz*. In Wechselwirkung mit diesen FEP steht der *Fluiddruck*. Im Zusammenhang mit der Funktion der Barrieren ist zu untersuchen, in welchem Umfang die *Auflockerungszone* und die *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* durch die gebirgsmechanische Situation beeinflusst werden. Die Ausprägung der weiteren FEP entspricht der Variante B1.



**Abb. 2.11** Einflussfaktoren auf die Lageverschiebung des Schachtverschlusses

## 2.11.1 Auslösende FEP

### 2.11.1.1 Diapirismus

Durch den Salzaufstieg (Diapirismus) kommt es zu strukturellen Veränderungen im Schachtbereich, die zu Lageverschiebungen des Schachtverschlusses führen werden. Da die vorgesehene Funktionsdauer der Schachtverschlüsse 50.000 Jahre beträgt, ergibt sich bei einer mittleren Salzbewegungsrate von 0,02 mm/a eine Lageverschiebung von ca. 1 m. Der Schachtverschluss wird so ausgelegt, dass es auch bei asym-

metrischen Verschiebungen nicht zu einem Ausfall aller drei Dichtelemente kommen wird.

**Tab. 2.65** Beeinflussende FEP für das FEP *Diapirismus*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Inlandvereisung in randlicher Lage	Wirtsgestein

Alle Varianten: Beeinflussungen des Salzaufstieges und damit auch der Schachtverschlüsse durch kaltzeitliche Einwirkungen werden erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schächte stattfinden und sind daher von untergeordneter Bedeutung.

Die verschiedenen Salzgesteine sind unterschiedlich fließfähig und beeinflussen den Aufstieg des Salzkörpers.

### 2.11.1.2 Thermische Expansion oder Kontraktion

Durch die Erwärmung des Gebirges infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kommt es zur Expansion des Gebirges (*Wirtsgestein*) und zur *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*.

Beeinflussungen der Schachtverschlüsse durch kaltzeitliche Einwirkungen werden erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schächte stattfinden und sind daher von untergeordneter Bedeutung.

**Tab. 2.66** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Brennelement-Behälter
Permafrost	Versatz
Inlandvereisung in randlicher Lage	Verschlussmaterial*
Vollständige Inlandvereisung	Sonstige Verschlussbauwerke
Wärmeproduktion	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
<b>Beeinflussende FEP</b>	Bohrlochverrohrung
Abfallmatrix	Wirtsgestein
Sonstige Endlagerbehälter	Deck- und Nebengebirge

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Aus der *Wärmeproduktion* durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle (*Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter*) resultiert die Aufheizung und Expansion des Salzgebirges und der geotechnischen Barrieren. Das Temperaturfeld wird dabei durch die Geometrie der Einlagerungsfelder bestimmt. Bei Abklingen der Aufheizung kommt es zur Kontraktion.

Variante B2: Da die CASTOR-Behälter mit einer größeren Anzahl an Brennelementen beladen werden als die POLLUX-Behälter, haben sie eine höhere Wärmeleistung. Auch die CASTOR-Behälter mit HAW enthalten wesentlich mehr Kokillen als die POLLUX-Behälter. Dadurch werden sich Unterschiede in der Ausbildung des Temperaturfeldes und in der *Expansion oder Kontraktion* des Gebirges ergeben.

Variante C: Für die *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* ist die Einlagerungskonfiguration (300 m Bohrlöcher, BSK, Triple Pack) relevant, da diese für die Wärmeproduktion und die Temperaturverteilung verantwortlich ist.

## 2.11.2 Beeinflussende FEP

### 2.11.2.1 Erdbeben

Der Schachtverschluss wird entsprechend dem Sicherheitserdbeben ausgelegt, so dass es zu keinen relevanten Lageverschiebungen des Schachtverschlusses kommen kann, die die Funktion des Schachtverschlusses beeinträchtigen /MÜL 12a/.

### 2.11.2.2 Verschlussmaterial

Das für die Schottersäule und die Widerlager verwendete Verschlussmaterial ist entscheidend für die Langzeitstabilität und die Funktionalität des Schachtverschlusses.

Mögliche kaltzeitliche Einflüsse, wie *Glaziale Rinnenbildungen* und *Permafrost*, sind nicht relevant für die Lageverschiebung des Schachtverschlusses, da sie erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse auftreten.

Variante B1: Die Schachtverschlüsse werden so ausgelegt, dass es beim Referenzszenarium nur zu einer begrenzten Alteration der Verschlüsse (*Korrosion von Materia-*

lien mit Zement- oder Sorelphasen, Auflösung und Ausfällung) kommen wird, die nicht zu einer relevanten Lageverschiebung der Schachtverschlüsse führt.

Die Gebirgsspannungen wirken über die *Konvergenz* auf die Verschlussmaterialien. Sie werden bei der Auslegung des Verschlusses berücksichtigt und werden daher bei dem Referenzszenarium nicht zu einer Lageverschiebung des Schachtverschlusses führen.

*Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen* (Beton-Quellen) und *Quellen des Bentonits* werden ebenfalls bei der Barrierenauslegung berücksichtigt und werden daher im Referenzszenarium nicht zu einer Lageverschiebung des Schachtverschlusses führen.

Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sind spezifische Eigenschaften des Verschlussmaterials.

Varianten B2 und C: Die thermischen und mechanischen Einwirkungen auf die Verschlussmaterialien weichen aufgrund der anderen Endlagerkonfigurationen von der Variante B1 ab, werden aber durch die Auslegung der Barrieren abgedeckt.

**Tab. 2.67** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

Beeinflussende FEP	
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflösung und Ausfällung*
Konvergenz*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Quellen des Bentonits*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Permafrost	Glaziale Rinnenbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.11.2.3 Schachtverschlüsse

Das Design der Schachtverschlüsse ist entscheidend für deren Langzeitstabilität und Funktionalität /MÜL 12a/.

Da kaltzeitliche Einwirkungen erst zu späten Zeiten auftreten, sind sie für die Schachtverschlüsse nicht relevant.

**Tab. 2.68** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben*	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Diapirismus*	Lageverschiebung eines Schachtverschlusses
Subrosion	Kanalisation in Dichtelementen
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits*
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Auswirkungen eines *Erdbebens* oder des *Salzaufstiegs (Diapirismus)* werden durch die Auslegung des Schachtverschlusses begrenzt.

Die Eigenschaften der Schachtverschlüsse werden durch die Verschlussmaterialien und deren Quellvermögen (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung, Quellen des Bentonits*) bestimmt. Durch die Auslegung der Verschlüsse wird die *Alteration* so weit begrenzt, dass sie beim Referenzszenarium nicht zu einem Ausfall führen kann.

Die *Konvergenz* und die *Thermische Expansion oder Kontraktion* erzeugen Spannungen im Schachtverschluss. Dies wird, wie der *Fluiddruck*, bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt.

Die *Auflockerungszone* ist ein Bereich verminderter mechanischer Stabilität und kann daher zur *Lageverschiebung der Schachtverschlüsse* beitragen.

Varianten B2 und C: Die thermischen und mechanischen Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse weichen aufgrund der anderen Endlagerkonfigurationen von der Variante B1 ab, werden aber durch die Auslegung der Verschlüsse abgedeckt.

#### 2.11.2.4 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen ist im Referenzszenarium so weit begrenzt, dass sie nicht zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Funktion der Barrieren führen kann.

**Tab. 2.69** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*

Beeinflussende FEP	
Schachtverschlüsse*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Streckenverschlüsse	Auflockerungszone
Verschlussmaterial*	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Geochemisches Milieu im Grubenbau	Advektion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Kanalisation in Dichtelementen	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Auflösung und Ausfällung*	Diffusion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die Wahl des *Verschlussmaterials* und das Design der *Schachtverschlüsse* berücksichtigen die Alteration der Verschlüsse. Die *Streckenverschlüsse* sind für die Lageverschiebung der Schachtverschlüsse nicht relevant.

*Auflösung und Ausfällung* sowie *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* sind wichtige Prozesse bei der Alteration der Verschlüsse. Die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen* (Quellen des Bentons und Bentonits) wurden bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt. Die Auswahl der Baustoffe basiert auf dem aktuellen *Geochemischen Milieu im Grubenbau* und den *Hydrochemischen Verhältnissen im Deck- und Nebengebirge*.

Die *Auflockerungszone* ist ein Bereich verminderter mechanischer Stabilität und kann daher zur Lageverschiebung der Schachtverschlüsse beitragen.

### 2.11.2.5 Konvergenz

Durch die *Konvergenz* werden die Gebirgsspannungen auf die Verschlussbauwerke übertragen. Der aktuelle petrostatische Druck sowie die zukünftige Veränderung durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurden bei der Verschlussauslegung zu Grunde gelegt. Eine Lageverschiebung der Verschlüsse durch Gebirgsspannungen ist daher für das Referenzszenarium nicht zu unterstellen.

**Tab. 2.70** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*

Beeinflussende FEP	Fluiddruck*
Inventar: Sonstige Stoffe	Bohrlochverrohrung
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial*	Salzgruskompaktion
Versatz	Wirtsgestein
Schachtverschlüsse*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Streckenverschlüsse*	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*
Sonstige Verschlussbauwerke	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der Stützdruck, der sich auf die Schachtkontur ausgewirkt wird, und die resultierende Konvergenzentwicklung hängen von den mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Verschlussmaterialien sowie der Schachtverschlüsse ab. Bei einer Alteration der Verschlüsse können die Steifigkeitseigenschaften reduziert sein, was den Stützdruck und damit die Konvergenz beeinflusst.

Veränderungen des *Fluiddrucks* ändern den Stützdruck auf die Hohlraumkontur und beeinflussen damit den Konvergenzprozess.

Die Schachtverschlüsse enthalten oberhalb des zweiten Dichtelementes eine Langzeitdichtung aus Salzgrus. Dieser Salzgrus wird beim Einbau soweit verdichtet, das

seine weitere Kompaktion nicht zu einer Lageverschiebung der Schachtverschlüsse führen kann.

Die Zusammensetzung des Salinars (z. B. Einschaltungen von Anhydrit / Ton) beeinflusst das Konvergenzverhalten des Wirtsgesteins. *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* sowie *Konvergenz* beeinflussen sich wechselseitig.

Varianten B2 und C: Die aufgrund der anderen Endlagerkonfiguration abweichenden Spannungs- und Temperaturverhältnisse werden sich auf die Konvergenz auswirken. Die für die Variante C spezifischen FEP *Bohrlochverrohrung* und *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* sind im Hinblick auf die *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* nicht relevant.

#### 2.11.2.6 Fluiddruck

Im Schacht wird der Fluiddruck einerseits von der Wassersäule bestimmt, die von oben auf dem Schachtverschluss lastet und andererseits von den Lösungs- und Gasmengen im Grubengebäude, die von unten auf den Schachtverschluss einwirken. Falls der Fluiddruck, den für die Auslegung des Schachtverschlusses zugrunde gelegten Werte überschreitet, kann daraus eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses erfolgen.

Abweichungen des Fluiddrucks können sich in den verschiedenen Varianten durch die unterschiedliche Konvergenz und durch Unterschiede bei der Gasbildung (Metallkorrosion) ergeben.

**Tab. 2.71** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*

Beeinflussende FEP	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung	Quellen des Bentonits*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Wärmeproduktion
Konvergenz*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der Fluiddruck wird durch die Lösungs- und Gasmengen im Grubengebäude bestimmt. Beim Referenzszenarium des Endlagersystems treten nur geringe Feuchtemengen in den Einlagerungsbereichen auf (Restfeuchte im Behälter und im Versatz, Gebirgsfeuchte). In die Einlagerungsbereiche für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle werden durch die Abfallgebinde größere Lösungsmengen (6.431 t) eingebracht. Aus einem Lösungsreservoir im Leine-Salz können max. 5.100 m<sup>3</sup> Lösung sowie durch die Schachtverschlüsse einige 100 m<sup>3</sup> in den Infrastrukturbereich zutreten. Der Gasdruck wird zunächst durch die eingeschlossene Luft bestimmt. Später wird er durch die Gasbildung (mikrobielle Prozesse, *Metallkorrosion* und *Radiolyse*), vor allem im Bereich mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen erhöht. Weiteres Gas kann aus den *Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Wirtsgestein* und der *Thermochemischen Sulfatreduktion* resultieren. Falls der Fluiddruck die kleinste Hauptspannung im Gebirge überschreitet, kann es zur *Druckgetriebenen Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* kommen, wobei die Integrität des Gesteins nicht beeinträchtigt wird.

Durch Volumenänderungen infolge der *Konvergenz* der Hohlraumkontur, durch *Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien*, durch das *Quellen von Bentonit*, durch die *Wärmeproduktion* und durch die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Salzgebirges und der Baustoffe wird der Fluiddruck beeinflusst.

Varianten B2 und C: Konzeptspezifische Abweichungen werden bei der *Konvergenz*, den *Lösungen im Grubenbau*, der *Wärmeproduktion*, der *Thermischen Expansion oder Kontraktion* sowie eventuell bei der *Gasmenge (Metallkorrosion)* erwartet. Die anderen FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1

#### **2.11.2.7 Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen**

Die für die Lageverschiebung von Schachtverschlüssen relevanten nicht thermisch induzierten Volumenänderungen umfassen das *Quellen des Bentonits* und Betonen beim Durchströmen mit Wasser sowie die Setzungen der als Widerlager genutzten Schotter säulen. Während das Quellen des Bentonits (Quelldruck begrenzt) für die Funktionalität der Dichtelemente wichtig ist, werden die anderen Prozesse durch entsprechende Materialwahl und Einbringtechnik so weit begrenzt, dass sie die Funktion der Verschlüsse nicht beeinträchtigen.

Die für die *Thermochemische Sulfatreduktion* erforderlichen Temperaturen werden am Schacht nicht erreicht.

**Tab. 2.72** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung*

<b>Auslösende FEP</b>	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*
Salzgruskompaktion	Streckenverschlüsse
Quellen des Bentonits*	Sonstige Verschlussbauwerke
Metallkorrosion	Konvergenz*
Korrosion der Brennstoffmatrix	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Korrosion von Glas	Lösungen im Grubenbau
<b>Beeinflussende FEP</b>	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Inventar: Sonstige Stoffe	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Versatz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Verschlussmaterial*	Thermochemische Sulfatreduktion
Schachtverschlüsse*	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.11.2.8 Quellen des Bentonits

Variante B1: Die Wahl der Verschlussmaterialien und das Design der Verschlüsse bestimmen das Bentonit-Quellen. Bei der Alteration z. B. der Betonwiderlager freigesetzte Korrosionsprodukte können das Quellen des Bentonits beeinflussen.

Die durch die *Konvergenz* übertragenen Gebirgsspannungen wirken dem Quellen des Bentonits entgegen. Das Quellen der Baustoffe wird durch *Lösungen im Grubenbau* initiiert, wobei auch der Chemismus entscheidend ist.

Varianten B2 und C: Unter den beeinflussenden FEP, die für den Schachtverschluss relevant sind, ändert sich wahrscheinlich nur die *Konvergenz* in signifikanter Weise bei den Varianten B2 und C. Die anderen FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.73** Beeinflussende FEP für das FEP *Quellen des Bentonits*

Beeinflussende FEP	Lösungen im Grubenbau
Verschlußmaterial	Kanalisation in Dichtelementen
Schachtverschlüsse	Lösungszutritt ins Grubengebäude
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Konvergenz	Auflockerungszone
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.11.2.9 Auflösung und Ausfällung

Die *Auflösung und Ausfällung* ist ein Teilprozess der Alteration der Verschlüsse und wird durch die Wahl der Verschlussmaterialien und das Verschlussdesign begrenzt.

Alle Varianten: Das Auftreten von Lösungs- und Ausfällungsprozessen hängt von den Baumaterialien, dem Chemismus der Lösungen und den Druckverhältnissen, die durch die Gebirgsspannungen erzeugt werden, ab. Am oberen Schachtdichtelement stehen unmittelbar Deckgebirgslösungen an, die vor allem die Betonwiderlager, aber nicht das Bentonitdichtelement anlösen. Beim Durchströmen kann es aber zu Ausfällungen im Porenraum des Bentonits kommen. Die Langzeitdichtung aus Salzgrus oder das Wirtsgestein können beim Zutritt teilgesättigter Deckgebirgslösungen angelöst werden. Komplexbildung kann durch die Bildung neuer Verbindungen mit anderen Löslichkeiten zu Auflösungs- und Ausfällungsprozessen führen. Da viele Löse- und Ausfällungsprozesse von der Temperatur (*Wärmeproduktion*) beeinflusst werden, kann das unterschiedliche Temperaturfeld bei den drei Varianten zu unterschiedlichen Ausprägungen des FEP *Auflösung und Ausfällung* führen.

Die Abweichungen des geochemischen Milieus im Nahfeld der Varianten B2 und C wird sich vermutlich nicht relevant im Schacht auswirken.

**Tab. 2.74** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Auflösung und Ausfällung*

<b>Auslösende FEP</b>	
Lösungen im Grubenbau	Geochemisches Milieu im Grubenbau
<b>Beeinflussende FEP</b>	Verschlussmaterial
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Versatz
Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge	Inventar: Sonstige Stoffe
Wirtsgestein	Verdampfen von Wasser
Komplexbildung	Wärmeproduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.11.2.10 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Die Schachtverschlüsse werden entsprechend den aktuellen Spannungsverhältnissen und den erwarteten Veränderungen durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Gebirge ausgelegt. Berücksichtigt wird außerdem eine Überflutung des Standortes mit 50 m Wasserüberdeckung aufgrund einer anthropogen bedingten Klimaänderung. Da für das Referenzszenarium während der vorgesehenen Funktionsdauer der Barrieren (50.000 Jahre) darüber hinaus keine wesentliche Änderung dieser Spannungsverhältnisse unterstellt wird, ist auch keine dadurch initiierte Lageverschiebung anzunehmen. Alle Barrieren (Endlagerbehälter, *Streckenverschlüsse*, *Sonstige Verschlussbauwerke* etc.) und technischen Einrichtungen auf der Einlagerungssohle sind im Hinblick auf die Lageverschiebung des Schachtverschlusses nicht relevant.

Variante B1: Die Auswirkungen von *Erdbeben* und Salzaufstieg (*Diapirismus*) werden bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt. Spannungsänderungen durch klimatische Einflüsse werden entweder zu späten Zeiten und damit nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse auftreten (Kaltzeiten) oder sich nur geringfügig auswirken (Sedimentation).

Der Grundspannungszustand im Gebirge wird durch die Eigenschaften des Wirtsgesteins sowie des Deck- und Nebengebirges bestimmt. Im Grubengebäude wird über Versatz sowie Verschlüsse ein Stützdruck auf das Gebirge ausgeübt. Dabei kann ein

Quellen eines Baumaterials zu einer Druckerhöhung und eine Setzung (z. B. einer Schottersäule) zu einer Druckerniedrigung führen.

*Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* sowie *Konvergenz* beeinflussen sich wechselseitig.

**Tab. 2.75** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Verschlussmaterial*
Erdbeben*	Schachtverschlüsse*
Sedimentation	Streckenverschlüsse
Diapirismus*	Sonstige Verschlussbauwerke
Transgression oder Regression	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Inlandvereisung in randlicher Lage	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Ausfall eines Dichtpfropfens
Glaziale Rinnenbildung	Konvergenz*
Thermische Expansion oder Kontraktion*	Fluiddruck*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Brennelement-Behälter	Salzgruskompaktion
Sonstige Endlagerbehälter	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*
Versatz	Quellen des Bentonits*
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Außerdem kann ein entsprechend hoher *Fluiddruck* einen Stützdruck auf das Gebirge ausüben und damit die Spannungsverhältnisse ändern. Die *Salzgruskompaktion* ist im Hinblick auf die Eigenschaften des Langzeitdichtelementes relevant.

Varianten B2 und C: Die unterschiedlichen Endlagerkonfigurationen werden zu einem abweichenden Temperaturfeld und zu einer entsprechenden *Expansion oder Kontrak-*

*tion* des Gebirges und der Verschlüsse führen. Wichtig für die Spannungsverhältnisse im Schacht sind außerdem abweichende Ausprägungen der *Konvergenz* und des *Fluiddrucks*. Die anderen FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### **2.11.3 Nicht berücksichtigte FEP**

*Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* ist ein weniger wahrscheinliches FEP, das im Referenzszenarium nicht zu betrachten ist.

## 2.12 Quellen des Bentonits

Das obere Dichtelement der Schachtverschlüsse soll aus Ca-Bentonit errichtet werden /MÜL 12a/. Bei einem Lösungszutritt kommt es zur Aufsättigung und zum Quellen des Bentonits. Aus dem resultierenden Quelldruck baut sich in der Kontaktzone zwischen Dichtelement und Gebirge ein Kontaktdruck auf. Dieser Prozess ist entscheidend für die Funktionalität der Dichtelemente.

Das FEP wirkt direkt auf die Funktion der Initial-Barrieren „Schachtverschluss“, „Streckenverschluss“ als auch „Wirtsgestein“ ein.

Für die Bewertung der Ausprägung des FEP werden die Merkmale „Quelldruck“ (quantitativ) und „Homogenität der Aufsättigung“ (qualitativ) verwendet. Der Quelldruck kann mittels der Baustoffrezeptur eingestellt werden und darf die minimale Hauptspannung im Gebirge nicht überschreiten. Die Homogenität der Aufsättigung ist entscheidend für die Funktionalität des Dichtelementes (Entwicklung der hydraulischen Durchlässigkeit).

Variante B1: Das obere Dichtelement der Schachtverschlüsse wird aus Ca-Bentonit bestehen /ENG 11/. Die Aufsättigung des Bentonits beim Durchströmen der Barriere durch Flüssigkeiten führt zum Quellen und somit zu einem Quelldruck im Dichtelement, so dass sich in der Kontaktzone zwischen Dichtelement und Gebirge ein Stützdruck aufbaut /PUS 02/. Dieser Prozess ist entscheidend für die Funktionalität der Dichtelemente.

Wichtige Randbedingungen für das Quellen des Bentonits sind die Zusammensetzung und die Eigenschaften des *Verschlussmaterials* Ca-Bentonit und der *Lösungen im Grubenbau*. Beim Referenzszenarium wird ein Zutritt von zwei Lösungstypen zum Schacht unterstellt: Typ I: Süßwasser bis schwach salinar sowie Typ II: Hutgesteinslösungen, hoch salinar /LIN 12/. Das Quellvermögen und die Sorptionskapazität des Bentonits nehmen mit zunehmender Salinität des zutretenden Grundwassers ab. Der vorgesehene Bentonit wurde so gewählt, dass er mit dem Chemismus der erwarteten Lösungen kompatibel ist und dass der Quelldruck (ca. 1 MPa) den Fracdruck des angrenzenden Gebirges nicht überschreitet /ENG 11/.

Durch eine entsprechende Einbautechnik und begleitenden QS-Maßnahmen beim Einbau soll sichergestellt werden, dass sich die Bentonit-Dichtelemente beim Lösungszutritt gleichmäßig aufsättigen. Dabei wird die *Auflockerungszone* zu Beginn als ein Be-

reich mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit zur Aufsättigung des Bentonits beitragen. Eine lokale Erosion („Piping“) infolge einer unregelmäßigen Aufsättigung des Bentonits und eine resultierende lokal erhöhte hydraulische Durchlässigkeit sowie ein ungleichmäßiger Quelldruckaufbau im Dichtelement sind weniger wahrscheinlich.

Der *Fluiddruck* führt immer zu einer leichten Lageverschiebung des Bentonitdichte-  
elementes, woraus aber keine Beeinträchtigung der Dichtfunktion resultiert.

Aufgrund von leichten *Lageverschiebungen des Schachtverschlusses* infolge des Salzaufstiegs (*Diapirismus*) können, vor allem an der Schachtkontur, kurzzeitig Wegsamkeiten entstehen, durch die es erneut zum *Quellen des Bentonits* kommen kann.

Entsprechend der oben erwähnten Auswahl der Barrierenbaustoffe wird es nur in geringem Umfang zur Alteration der Verschlüsse (vor allem der Betonwiderlager) kommen. Die aus der Korrosion von Betonbaustoffen resultierenden Lösungsprodukte beeinträchtigen das Quell- und Sorptionsvermögen des Bentonits.

Die aus den Gebirgsspannungen resultierende *Konvergenz* wirkt dem Stützdruck entgegen, der durch das Bentonit-Quellen erzeugt wird, und sorgt für die gebirgsmechanische Einspannung der Elemente der Schachtverschlüsse. Der Quelldruck wird mit Hilfe der Bentonitrezeptur so eingestellt, dass er unterhalb des Fracdrucks des Gebirges bleibt.

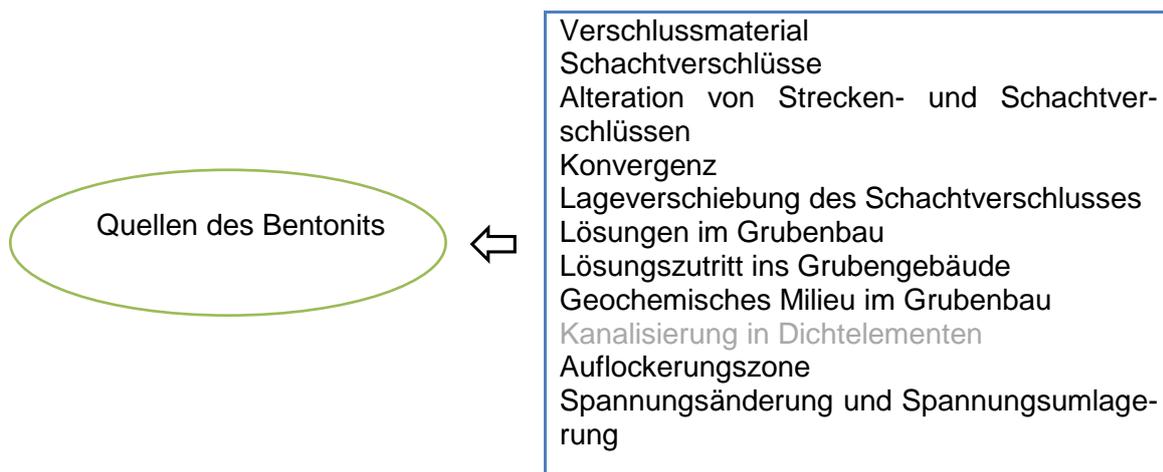
Kaltzeitliche Beeinträchtigungen der Schachtverschlüsse durch Spannungsänderungen (*Inlandvereisung*), *Permafrost*, *Glaziale Rinnenbildungen* oder geänderten Grundwasserchemismus sind sicherheitstechnisch nur von untergeordneter Bedeutung, da derartige Klimaentwicklungen erst nach Ablauf der vorgesehenen Funktionsdauer der Barrieren auftreten werden.

Variante B2: Die Änderungen der Variante B2 betreffen nur die Konfiguration der Einlagerungsbereiche. Auswirkungen auf die Schächte können sich nur durch weitreichende thermische und mechanische Einflüsse ergeben. Die abweichende Intensität dieser Prozesse im Vergleich zur Variante B1 ist qualitativ nicht abzuschätzen und muss durch Prozessanalysen untersucht werden. Die Funktionalität des Bentonit-Dichtelementes hängt von der ausreichenden Einspannung in der Schachtröhre ab. Die entsprechenden FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion* und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* beeinflussen die Ausprägung der *Konvergenz* und

des *Fluiddrucks*, die wichtige Lastfälle bei der Auslegung der Verschlüsse darstellen. Für die Funktionalität der Dichtelemente ist auch die Ausprägung der *Auflockerungszone* wichtig. Diese wird ebenfalls durch die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflusst. Aus den Änderungen der Variante B2 ergeben sich keine Abweichungen des *Geochemischen Milieus im Grubenbau*, die das Quellvermögen des Bentonits beeinflussen. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Im Schachtbereich relevante Abweichungen der Umweltbedingungen in der Variante C betreffen die thermischen und mechanischen Verhältnisse, die in Prozessanalysen ermittelt werden müssen.

Wichtige FEP sind *Thermische Expansion oder Kontraktion* und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*, da sie auch die Ausprägung der FEP *Konvergenz* und *Fluiddruck* beeinflussen, die wichtige Lastfälle bei der Auslegung der Verschlüsse darstellen. Für die Funktionalität der Dichtelemente ist auch die Ausprägung der *Auflockerungszone* wichtig, die ebenfalls durch die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflusst wird. Das *Geochemische Milieu im Grubenbau* entspricht im Fernfeld der Variante B1, so dass sich keine abweichenden Einflüsse auf das Quellvermögen des Bentonits ergeben. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.



**Abb. 2.12** Einflussfaktoren auf das Quellvermögen des Betonit

### 2.12.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.12.2 Beeinflussende FEP

#### 2.12.2.1 Verschlussmaterial

Das vorgesehene Verschlussmaterial (Bentonit-Spezifikation) ist entscheidend für die Langzeitstabilität und die Funktionalität des Dichtelementes /MÜL 12a/.

Beeinflussungen der Schachtverschlüsse durch kaltzeitliche Einwirkungen (*Permafrost*, *Glaziale Rinnenbildung*) werden erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schächte stattfinden und sind daher von untergeordneter Bedeutung.

**Tab. 2.76** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

Beeinflussende FEP	
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflösung und Ausfällung
Konvergenz*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Thermische Expansion oder Kontraktion
Quellen des Bentonits	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Permafrost	Glaziale Rinnenbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Schachtverschlüsse werden so ausgelegt, dass es beim Referenzszenarium nur zu einer begrenzten Alteration der Verschlüsse kommen wird. Mögliche Beeinflussungen des Quellvermögens der Bentonit-Dichtelemente könnten sich aus der Salinität und den gelösten Zementbestandteilen (aus der Korrosion der Widerlager) in zutretenden Lösungen ergeben.

Die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* sowie *Auflösung und Ausfällung* beeinflussen indirekt über das *Geochemische Milieu im Grubenbau* die Bentonit-Dichtelemente.

Die Gebirgsspannungen, die u. a. durch thermische Expansion oder Kontraktion ausgelöst werden können, führen durch die Konvergenz zur Einspannung der Dichtelemente und wirken dem Quelldruck entgegen.

Varianten B2 und C: Die FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* haben eine andere Ausprägung als in der Variante B1.

### 2.12.2.2 Schachtverschlüsse

Das Design der Schachtverschlüsse ist entscheidend für die Langzeitstabilität und Funktionalität der Bentonit-Dichtelemente.

Da kaltzeitliche Einwirkungen erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Barrieren auftreten, ist eine späte Beeinträchtigung der Funktion der Schachtverschlüsse sicherheitstechnisch nicht relevant.

**Tab. 2.77** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*

Beeinflussende FEP	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Diapirismus	Lageverschiebung eines Schachtverschlusses*
Subrosion	Kanalisation in Dichtelementen
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone*
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Auswirkungen eines *Erdbebens* oder des *Salzaufstiegs (Diapirismus)* werden durch die Auslegung des Schachtverschlusses begrenzt.

Die Eigenschaften der Schachtverschlüsse werden durch die Verschlussmaterialien und deren Quellvermögen bestimmt. Durch die Auslegung der *Schachtverschlüsse* wird die Alteration so weit begrenzt, dass sie beim Referenzszenarium während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht zu einem Ausfall führen kann. Die Konvergenz führt zur Einspannung des Schachtverschlusses. Die thermische Expansion oder Kontraktion der Verschlussmaterialien und des Gebirges werden bei der Auslegung des Schachtverschlusses berücksichtigt. Die Gebirgsspannungen beeinflussen die Schachtverschlüsse und wirken sich auf das Quellen der Bentonit-Dichtelemente aus.

Der *Fluiddruck* wirkt sich auf die Aufsättigung der Bentonit-Dichtelemente aus. Da die *Auflockerungszone* zu Beginn ein Bereich mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ist, trägt sie zur Aufsättigung der Bentonit-Dichtelemente bei.

Varianten B2 und C: Die FEP *Konvergenz, Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* haben eine andere Ausprägung als in der Variante B1. Sie sind entscheidend für die Einspannung des Dichtelementes. Der *Fluiddruck* und die *Auflockerungszone* können die Aufsättigung des Bentonits und damit die Funktionalität des Dichtelementes beeinflussen.

### **2.12.2.3 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen**

Die *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* ist beim Referenzszenarium durch die Barrierenauslegung so weit begrenzt, dass sie nicht zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Funktion der Barrieren führen kann. Für das *Quellen des Bentonits* sind Prozesse relevant, die das geochemische Milieu beeinflussen und sich so auf den Bentonit auswirken.

Variante B1: Das *Verschlussmaterial* und Design der *Schachtverschlüsse* ist entscheidend für deren Langzeitstabilität und Funktionalität. Da die *Streckenverschlüsse* aus Beton bestehen, ist das Bentonit-Quellen für sie nicht relevant.

*Auflösung und Ausfällung* sowie *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* sind wichtige Prozesse bei der Alteration der Verschlüsse. Sie beeinflussen über das *Geochemische Milieu im Grubenbau* auch die Bentonit-Dichtelemente.

Von den *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* wirkt sich das Quellen der Betonwiderlager nur in geringem Umfang auf die Bentonit-Dichtelemente aus. Das aktuelle *Geochemische Milieu im Grubenbau* und die *Hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge* wurden bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt.

Da die *Auflockerungszone* zu Beginn ein Bereich mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ist, trägt sie zur Aufsättigung der Bentonit-Dichtelemente bei. Für die Bentonit-Dichtelemente ist vor allem ein Stofftransport durch *Diffusion* relevant.

Varianten B2 und C: Die abweichende Ausbildung des geochemischen Milieus in den Varianten betrifft vor allem das Nahfeld. In wieweit die geänderten Temperatur- und Spannungsverhältnisse in den Varianten B2 und C die *Auflockerungszone* beeinflussen, so dass sie die Alteration begünstigen, kann auf der Basis von reinen Plausibilitätsbetrachtungen nicht eingeschätzt werden.

**Tab. 2.78** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*

Beeinflussende FEP	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Streckenverschlüsse	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Auflockerungszone*
Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Advektion
Lageverschiebung des Schachtverschlusses*	Diffusion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.12.2.4 Konvergenz

Durch die *Konvergenz* werden die Gebirgsspannungen auf die Verschlussbauwerke übertragen. Der aktuelle petrostatische Druck sowie seine Veränderung infolge der

Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wurden bei der Verschlussauslegung zugrunde gelegt. Die *Konvergenz* führt zur Einspannung der Dichtelemente und ist daher für die Funktionalität der Barrieren wichtig. Bei den Abhängigkeiten werden im Folgenden nur die FEP betrachtet, die für die Schachtverschlüsse relevant sind.

Variante B1: Der Stützdruck, der sich auf die Schachtkontur ausgewirkt hat, und die resultierende Konvergenzentwicklung hängen von den mechanischen Eigenschaften des lokal unterschiedlichen *Verschlussmaterials* sowie der *Schachtverschlüsse* ab. Der Quelldruck des Bentonits wird durch entsprechende Materialwahl so begrenzt, dass er die Integrität des Gebirges nicht beeinträchtigt, aber den erforderlichen Druck für die Einspannung des Dichtelementes erzeugt. Bei einer Alteration der Verschlüsse kann das Quellvermögen des Bentonits reduziert werden, was den Stützdruck und damit die Konvergenz beeinflusst.

Veränderungen des Fluiddrucks führen zu Änderungen des Stützdruckes an der Hohlraumkontur und beeinflussen damit die Konvergenz.

Da im Schachtverschluss kein Kontakt zwischen dem Salzgrus und dem Bentonit-Dichtelement besteht, ist die *Salzgruskompaktion* für das *Quellen des Bentonits* nicht relevant.

Die Zusammensetzung des Salinars (z. B. Anhydrit / Ton-Einschaltungen) beeinflusst das Konvergenzverhalten des Wirtsgesteins und wirkt sich so auch auf die Bentonit-Dichtelemente aus. *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie *Konvergenz* beeinflussen sich wechselseitig.

**Tab. 2.79** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Sonstige Stoffe	Bohrlochverrohrung
Versatz	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial*	Fluiddruck
Schachtverschlüsse*	Salzgruskompaktion
Streckenverschlüsse	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Wirtsgestein
Sonstige Verschlussbauwerke	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B2 und C: Aufgrund der geänderten Spannungsverhältnisse im Gebirge und des abweichenden *Fluiddrucks* wird die *Konvergenz* anders entwickelt sein als in der Variante B1.

#### 2.12.2.5 Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses kann zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit und damit zu einem erneuten Quellen des Bentonits führen.

**Tab. 2.80** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*

<b>Auslösende FEP</b>	Konvergenz*
Diapirismus	Fluiddruck
Thermische Expansion oder Kontraktion	Sonstige Verschlussbauwerke
<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Verschlussmaterial*	Quellen des Bentonits
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Während der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren wird eine Lageverschiebung durch Salzaufstieg (*Diapirismus*) von ca. 1 bis 1,5 m erwartet. Der Schachtverschluss wird so ausgelegt, dass es bei diesen Verschiebungen nicht zu einem Ausfall aller drei Dichtelemente kommen wird. Die thermische Expansion oder Kontraktion der Verschlussmaterialien wird bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt /MÜL 12a/.

Das Bemessungserdbeben wurde bei der Auslegung der Beton-Widerlager berücksichtigt. Eine Lageverschiebung der Schachtverschlüsse aufgrund einer Beeinträchtigung der Widerlager ist daher weniger wahrscheinlich.

Das für die Widerlager und die Dichtelemente verwendete *Verschlussmaterial* und das Barrierendesign sind entscheidend für die Langzeitstabilität und die Funktionalität des Schachtverschlusses. Die Alteration des Schachtverschlusses ist durch die Auslegung begrenzt. Im Hinblick auf die Funktion der Bentonit-Dichtelemente ist vor allem die Korrosion der Betonwiderlager relevant.

Auslaugungen des Wirtsgesteins (*Auflösung und Ausfällung*) sowie hieraus resultierende Instabilitäten der Widerlager und Dichtelemente sind weniger wahrscheinlich und werden daher für das Referenzszenarium nicht unterstellt.

Die *Konvergenz*, die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* (Beton-Quellen) und das *Quellen des Bentonits* tragen zu einer Einspannung und damit zur Stabilität des Schachtverschlusses bei. Die Einspannung der Dichtelemente kann sich ändern, falls sich die Spannungsverhältnisse im Gebirge ändern.

Varianten B2 und C: Aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration werden die *FEP Konvergenz*, *Fluiddruck* und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben.

#### 2.12.2.6 Lösungen im Grubenbau

Die *Lösungen im Grubengebäude* führen zu einer Aufsättigung des Bentonits und anderer Baumaterialien mit Lösung und initiieren damit eine Volumenzunahme durch Quellen.

Die Lösungen stammen aus Lösungszutritten aus dem Wirtsgestein (in der Leine-Folge Reservoir bis 5.100 m<sup>3</sup>, im Staßfurt-Salz Gebirgsfeuchte < 0,02 Gew.-%), Lösungszutritten über die Schächte (ca. einige 100 m<sup>3</sup>), aus dem Versatz (trockener Salzgrus Gebirgsfeuchte < 0,02 Gew.-%, feuchter Salzgrus 0,6 Gew.-%, Sandverfüllung der Einlagerungsbohrlöcher: 0,2 Gew.-%), aus der Restfeuchte der Brennelement-Behälter (CASTOR: max. 120 g, POLLUX: max. 60 g, BSK max. 20 g) sowie die Abfallgebände mit vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen (6.772 t). Unterschiede zwischen den Varianten ergeben sich durch unterschiedliche Behälertypen und Versatzmengen.

Variante B1: Strömungsvorgänge bewegen Lösungen in einem Grubenbau. Sie sind wichtig für das Aufsättigen des Bentonits.

Das Quellvermögen des Bentonits wird vor allem durch das *Geochemische Milieu im Grubenbau* beeinflusst. Die Temperatur (*Wärmeproduktion*) ist nur von untergeordneter Bedeutung. *Auflösung und Ausfällung* und Korrosionsprozesse beeinflussen das geochemische Milieu und wirken sich so auf das Bentonit-Quellen aus.

Nahfeld-Prozesse (*Verdampfen von Wasser*, *Radiolyse* und *Thermochemische Sulfat-reduktion*) sind für das Bentonit-Quellen im Schacht nicht relevant.

Varianten B2 und C: Im Hinblick auf mögliche Einwirkungen auf den Schacht sind die abweichenden Versatz- und Lösungsmengen (vor allem die Mengen an feuchtem Salzgrus) zu prüfen.

**Tab. 2.81** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lösungen im Grubenbau*

<b>Auslösende FEP</b>	Auflösung und Ausfällung
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Metallkorrosion
<b>Beeinflussende FEP</b>	Korrosion der Brennstoffmatrix
Inventar: Sonstige Stoffe	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Abfallmatrix	Zersetzung von Organika
Versatz	Wärmeproduktion
Verschlussmaterial*	Verdampfen von Wasser
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Radiolyse
Geochemisches Milieu im Grubenbau*	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.12.2.7 Lösungszutritt ins Grubengebäude

Lösungszutritte aus dem Salzgebirge oder dem Deckgebirge führen entsprechend ihrem unterschiedlichen Chemismus zu einem unterschiedlichen Quellen des Bentonits. So verlieren Bentonite einen Teil ihres Quellpotenzials mit zunehmender Salinität des durchströmenden Fluids.

Variante B1: Im Schachtbereich kann es zu Lösungszutritten aus dem Wirtsgestein z. B. aus der Gorlebenbank kommen.

Wichtige Randbedingungen für den Lösungszutritt sind die Druckverhältnisse (*Fluiddruck*) sowie *Porosität* und *Permeabilität* von Verschluss- und Versatzmaterialien.

*Fluidvorkommen im Wirtsgestein* können durch *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* sowie durch die *Auflockerungszone* mit dem Grubengebäude verbunden sein.

Die vorhandene Wassersäule im *Deck- und Nebengebirge* definiert den am Schacht anstehenden hydraulischen Druck, der für die Aufsättigung der Bentonit-Dichtung verantwortlich ist.

*Thermomigration* ist nur in den Einlagerungsbereichen relevant und spielt daher für die Schächte keine Rolle. Das Auftreten von *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* ist weniger wahrscheinlich und daher im Referenzszenarium nicht zu betrachten.

Varianten B2 und C: Abweichungen zur Variante B1 sind beim *Fluiddruck* möglich, da dieser durch die *Konvergenz* beeinflusst wird, die sich aufgrund anderer Spannungsverhältnisse im Gebirge anders entwickelt als in der Variante B1. Der Fluiddruck ist eine wichtige Randbedingung für den Lösungszutritt.

**Tab. 2.82** Beeinflussende FEP für das FEP *Lösungszutritt ins Grubengebäude*

Beeinflussende FEP	Auflockerungszone*
Fluidvorkommen im Wirtsgestein	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
Fluiddruck	Deck- und Nebengebirge
Porosität	Thermomigration
Permeabilität	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

### 2.12.2.8 Geochemisches Milieu im Grubenbau

Das Quellvermögen des Bentonits wird maßgeblich durch das geochemische Milieu im Grubenbau beeinflusst.

Die FEP *Mikrobielle Prozesse im Grubenbau, Radiolyse, Thermochemische Sulfatreduktion* und *Komplexbildung* sind von geringer Bedeutung bzw. finden nur in den Einlagerungsbereichen statt.

Die Änderungen des geochemischen Milieus im Nahfeld der Varianten B2 und C sind vernachlässigbar gering.

Variante B1: Die mit den Abfällen und den Bauwerken verbundenen Festphasen, Lösungen und Gase sowie die Eigenschaften des Wirtsgesteins und mögliche Wechselwirkungen (Alteration, Auflösung und Ausfällung, Korrosionsprozesse) bestimmen das geochemische Milieu und beeinflussen darüber auch das Quellvermögen des Bentonits.

Der Ablauf der meisten geochemischen Reaktionen ist temperaturabhängig und wird daher durch die *Wärmeproduktion* der eingebrachten Abfälle beeinflusst.

Durch *Advektion* und *Diffusion* können die Stoffkonzentrationen und damit das geochemische Milieu verändert werden.

Varianten B2 und C: Die Lösungsmengen werden aufgrund abweichender Mengen an feuchtem Salzgrusversatz anders sein als in der Variante B1. Die Restfeuchte in der Sandverfüllung der Einlagerungsbohrlöcher wird zu einer frühen Korrosion der Bohrlochverrohrung und der Behälter führen. Die resultierende *Gasbildung* kann über den *Fluiddruck* die *Schachtverschlüsse* beeinflussen.

**Tab. 2.83** Beeinflussende FEP für das FEP *Geochemisches Milieu im Grubenbau*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Inventar: Metalle	Korrosion von Glas
Inventar: Organika	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Inventar: Sonstige Stoffe	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Zersetzung von Organika
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Lösungen im Grubenbau*	Wärmeproduktion
Auflösung und Ausfällung	Gasmenge im Grubenbau
Metallkorrosion	Radiolyse
Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Wirtsgestein	Advektion
Thermochemische Sulfatreduktion	Diffusion
Komplexbildung	Korrosion der Brennstoffmatrix

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.12.2.9 Auflockerungszone

Die Auflockerungszone bildet sich im Konturbereich der Grubenräume durch Spannungsänderungen im Gebirge. Sie stellt einen Bereich mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit dar, der sich später durch den Gebirgsdruck und den Stützdruck von Barrie-

ren und Versatz wieder schließt. Solange die Auflockerungszone hydraulisch leitend ist, kann sie zur Aufsättigung der Bentonit-Dichtelemente beitragen. Der Stützdruck durch das Quellen des Bentonits wird zum Schließen der Auflockerungszone beitragen.

**Tab. 2.84** Beeinflussende FEP für das FEP *Auflockerungszone*

Beeinflussende FEP	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Inventar: Sonstige Stoffe	Konvergenz*
Verschlussmaterial*	Salzgruskompaktion
Schachtverschlüsse*	Quellen des Bentonits
Streckenverschlüsse	Thermische Expansion oder Kontraktion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Wirtsgestein
Sonstige Verschlussbauwerke	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Bohrlochverrohrung	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Wechselwirkung aus den Gebirgsspannungen und dem Stützdruck der Barrieren bestimmt die Eigenschaften der Auflockerungszone. Dabei spielen auch die visko-elasto-plastischen Eigenschaften des Wirtsgesteins eine Rolle

Wichtig für die Ausbildung der Auflockerungszone sind die Steifigkeit der Verschlussmaterialien und der Konturnachschnitt an den Barrierenstandorten.

Durch die Konvergenz läuft das Gebirge auf die Barriere auf und die Auflockerungszone wird sich durch den Stützdruck der Barriere schließen. Dieser Prozess kann bei einem Quellen von Baustoffen (z. B. Bentonit) beschleunigt werden.

Falls ein Verschlusselement alteriert und die mechanische Stabilität beeinträchtigt wird, wird der Stützdruck auf das Gebirge reduziert, was sich auf die Auflockerungszone auswirkt.

Die *Salzgruskompaktion* spielt für die Schachtverschlüsse nur im Hinblick auf eine Langzeitdichtung oberhalb des zweiten Schachtdichtelementes eine Rolle.

Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges und ihre Auswirkung auf die Einspannung der Verschlussbauwerke und die ALZ wird bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt.

Varianten B2 und C: Die Gebirgsspannungen und die resultierenden Konvergenzen werden aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration anders entwickelt sein als in der Variante B1. Ob und wie sich diese Spannungsverhältnisse auf die Auflockerungszone im Schacht auswirken, muss geprüft werden.

#### **2.12.2.10 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung**

Die Schachtverschlüsse werden entsprechend den aktuellen Spannungsverhältnissen und den Veränderungen durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Gebirge ausgelegt. Berücksichtigt wird außerdem eine Überflutung des Standortes mit 50 m Wasserüberdeckung aufgrund einer anthropogen bedingten Klimaänderung.

Kaltzeitlich bedingte Spannungsänderungen (z. B. durch Inlandvereisung) treten erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auf und sind daher nur von untergeordneter Bedeutung.

Die Spannungsverhältnisse im Gebirge werden aufgrund der anderen Endlagerkonfigurationen in den Varianten B2 und C anders ausgebildet sein als in der Variante B1.

Variante B1: Die Auswirkungen von *Erdbeben* und Salzaufstieg (*Diapirismus*) werden bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt. Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges infolge der Aufheizung durch die wärmeentwickelnden Abfälle und die spätere Abkühlung führt zu *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* im Gebirge.

Der Grundspannungszustand im Gebirge wird durch die Eigenschaften des *Wirtsgesteins* sowie des *Deck- und Nebengebirges* bestimmt. In den Schächten üben die Schachtverschlüsse einen Stützdruck auf das Gebirge aus. Dabei führen z. B. die *Quellen des Bentonits* zu einer Druckerhöhung und eine Setzung (z. B. der Schotterwiderlager) zu einer Druckerniedrigung.

*Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* sowie *Konvergenz* beeinflussen sich wechselseitig. Außerdem kann ein entsprechend hoher *Fluiddruck* einen Stützdruck auf das Gebirge ausüben und damit die Spannungsverhältnisse ändern.

Varianten B2 und C: Die Spannungsverhältnisse im Gebirge werden aufgrund der anderen Endlagerkonfiguration anders ausgebildet sein als in der Variante B1.

**Tab. 2.85** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Verschlussmaterial *
Erdbeben	Schachtverschlüsse*
Sedimentation	Streckenverschlüsse
Diapirismus	Sonstige Verschlussbauwerke
Transgression oder Regression	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Inlandvereisung in randlicher Lage	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Ausfall eines Dichtpfropfens
Glaziale Rinnenbildung	Konvergenz*
Thermische Expansion oder Kontraktion	Fluiddruck
<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Brennelement-Behälter	Salzgruskompektion
Sonstige Endlagerbehälter	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Versatz	Quellen des Bentonits
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Technische Eigenschaften und deren Eigenschaften	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

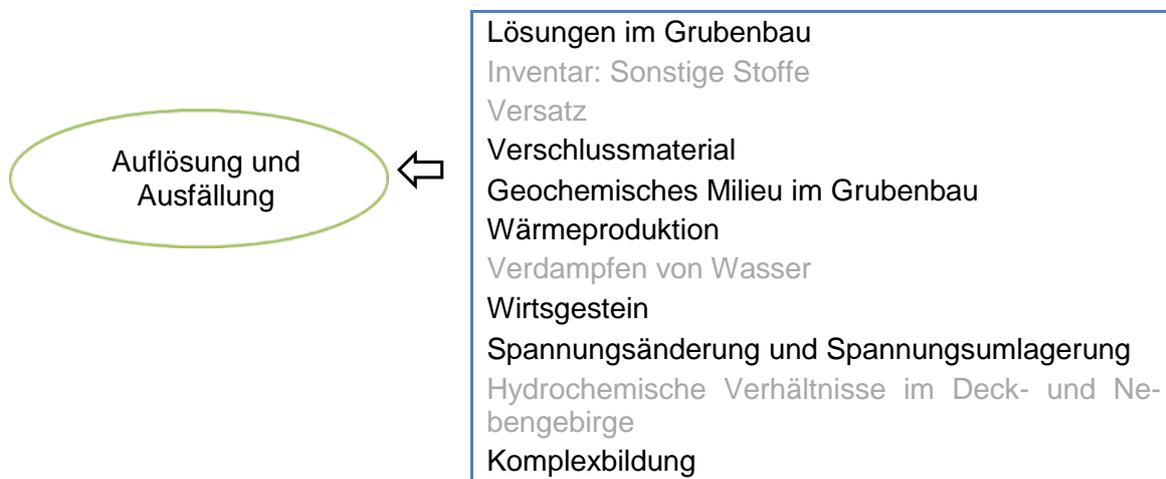
### 2.12.3 Nicht berücksichtigte FEP

*Kanalisation in Dichtelementen* ist ein weniger wahrscheinliches FEP, das im Referenzszenarium nicht zu betrachten ist.

## 2.13 Auflösung und Ausfällung

Die Herleitung der Ausprägung der Auflösungs- und Ausfällungsprozesse auf Initial-Barrieren und der dadurch möglichen Beeinträchtigung ihrer einschlusswirksamen Eigenschaften wird nachfolgend beschrieben. Auflösungsprozesse betreffen die Initial-Barrieren „Wirtsgestein“, die „Schachtverschlüsse“ und die „Streckenverschlüsse“ bei Anwesenheit von Lösungen. Ausfällungen werden nicht als beeinträchtigend angesehen. Die Ausprägung betrifft Art, Rate und Umfang der Auflösungs- und Ausfällungsprozesse. Die Vielzahl der möglichen Auflösungs- und Ausfällungsprozesse, die von lokalen Entwicklungen und Gegebenheiten abhängig sind, erfordert eine Einschätzung mittels geochemischer Modellrechnungen. Die Einschätzung einiger Auflösungs- und Ausfällungsprozesse von Zement- und Sorelphasen in Abhängigkeit von Lösungsangebot erfolgte z. B. für die Auslegung von Schacht- und Streckenverschlüssen.

Die Auflösungs- und Ausfällungsprozesse an POLLUX-, CASTOR-Behältern oder BSK werden im FEP *Metallkorrosion* angesprochen. Der Prozess der Abtragung des Salzgesteins am Salzspiegel durch Grundwasser als Auflösungsprozess (FEP *Subrosion*, Kapitel 2.3) wird gesondert behandelt.



**Abb. 2.13** Einflussfaktoren auf Auflösung und Ausfällung von Salzgestein

Auch bei geringen Lösungsmengen, die im Grubengebäude und in der Nähe der Einlagerungsbereiche im Referenzszenarium zu erwarten sind, laufen Auflösungs- und Ausfällungsprozesse ab und sind aufgrund der langen Zeiträume zu betrachten. Die ursprünglich vorhandenen Lösungen stehen im thermodynamischen Gleichgewicht mit den Mineralphasen des Hauptsalzes (Wirtsgestein, Salzbeton). Das Wirtsgestein wird

– außer durch Subrosion – im Referenzszenarium aufgrund der geringen im thermodynamischen Gleichgewicht vorliegenden Lösungsmengen in seiner Barrierenwirkung durch Auflösungs- und Ausfällungsprozesse nicht beeinträchtigt.

Die Einstellung eines thermodynamischen Gleichgewichts dieser Lösungen mit zementhaltigen Komponenten der Verschlussbauwerke führt zu Auflösungs- und Ausfällungsprozessen. Bei den Verschlussbauwerken bzw. Dichtelementen ist für lange Zeiträume eine Erhöhung der Durchlässigkeit nicht auszuschließen, die unter anderem auf Auflösungs- und Ausfällungsprozesse zurückzuführen ist. Die Ausprägung des FEP *Auflösung und Ausfällung* wurde mit Hilfe geochemischer Rechenprogramme bei der Bestimmung der Lebensdauer der Verschlussbauwerke berücksichtigt.

Die Auswirkungen einer Auflösung zementhaltiger Komponenten in den Verschlussbauwerken durch die anstehenden Lösungen werden im Initial-FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* und *Alteration von Schacht- oder Streckenverschlüssen* beschrieben.

Diese Ausprägung des Initial-FEP *Auflösung und Ausfällung* gilt im Referenzszenarium für alle drei Einlagerungsvarianten.

## **2.13.1 Auslösende FEP**

### **2.13.1.1 Lösungen im Grubenbau**

Lösungen sind Voraussetzung für die Auflösung von Bestandteilen des Wirtsgesteins oder eines Verschlussbauwerkes. Die verfügbaren Lösungsmengen für Auflösungs- und Ausfällungsprozesse sind im Referenzszenarium für Streckenverschlüsse und Wirtsgestein begrenzt. Die obersten Komponenten der Schachtverschlüsse stehen im Kontakt mit einer praktisch unbegrenzten Menge Grundwasser über dem Salzstock (siehe Ausprägung FEP *Subrosion*).

Nach Verschluss des Endlagers können Lösungen über den Schacht zutreten. Im Bereich der Leinefolge können Lösungsreservoirs mit einer Größe bis max. 5.100 m<sup>3</sup> auftreten /BfS 02/, die ggfs. über Wegsamkeiten in den Infrastrukturbereich gelangen können.

Die Gebirgsfeuchte im Hauptsalz der Staßfurt-Serie beträgt 0,012 bis 0,017 Gew.-% /BOR 08/. Die Feuchte des trockenen Salzgrusversatzes entspricht jener des aufgefahrenen Salzgesteins, der Feuchtegehalt für feuchten Salzgrusversatz beträgt ca. 0,6 Gew.-% in den Richtstrecken und ca. 1,5 Gew.-% im Schachtverschluss /BOL 12/. Der Quarzsand, der in die Einlagerungsbohrlöcher zur Verfüllung des Ringraums zwischen Behälter und Verrohrung sowie zur Trennung der Behälter eingebracht wird, hat als getrockneter Sand eine Restfeuchte von ca. 0,2 Gew.-% /BOL 12/. Zudem muss von geringen Restfeuchten in den Brennelement-Behältern ausgegangen werden /WOL 12/.

Die Lösungsmengen im Nahfeld der Behälter sind veränderlich, da ein Transport von Wasser durch Verdampfen sowie Bildung oder Verbrauch durch chemische Prozesse (vor allem Zersetzungs- und Korrosionsprozesse, Thermochemische Sulfatreduktion) möglich ist.

**Tab. 2.86** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lösungen im Grubenbau*

<b>Auslösende FEP</b>	Metallkorrosion
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Korrosion der Brennstoffmatrix
<b>Beeinflussende FEP</b>	Auflösung und Ausfällung
Radiolyse	Inventar: Sonstige Stoffe*
Verdampfen von Wasser*	Versatz*
Wärmeproduktion*	Verschlußmaterial*
Zersetzung von Organika	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Thermochemische Sulfatreduktion	Abfallmatrix
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Geochemisches Milieu im Grubenbau*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

## 2.13.2 Beeinflussende FEP

### 2.13.2.1 Geochemisches Milieu im Grubenbau

Umfang und Geschwindigkeit von Auflösungs- und Ausfällungsprozessen sind stark abhängig vom geochemischen Milieu. Das geochemische Milieu (z. B. pH- und Eh-Wert) und die Menge der Lösungen bestimmt in welchem Umfang Minerale des Wirts-

gesteins oder Materialien der Verschlussbauwerke gelöst werden können. Sind die Lösungen im Grubenbau nicht im thermodynamischen Gleichgewicht, findet eine Auflösung oder Ausfällung des entsprechenden Stoffes mit einer spezifischen Kinetik statt. Im Salzstock sind die Lösungen an NaCl-gesättigt bzw. im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem Salzgrusversatz und dem Hauptsalz. Auflösungs- und Ausfällungsprozesse sind für diese Materialien daher nur gering.

**Tab. 2.87** Beeinflussende FEP für das FEP *Geochemisches Milieu im Grubenbau*

Beeinflussende FEP	
Lösungen im Grubenbau*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Gasmenge im Grubenbau	Zersetzung von Organika
Inventar: Metalle	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Inventar: Organika	Wärmeproduktion*
Inventar: Sonstige Stoffe*	Diffusion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Advektion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Metallkorrosion	Thermochemische Sulfatreduktion
Korrosion der Brennstoffmatrix	Komplexbildung*
Korrosion von Glas	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die zement- bzw. sorelhaltigen Materialien der Verschlussbauwerke (Salzbeton, Sorel-beton) sind nicht über den gesamten Nachweiszeitraum im thermodynamischen Gleichgewicht mit den Lösungen im Endlager. Die Verschlüsse sind für ihre vorgesehene Funktionsdauer von 50.000 Jahren entsprechend der heute beobachteten Bandbreite der Deckgebirgs- und Wirtsgesteinslösungen aufgrund geochemischer Rechnungen ausgelegt. Dementsprechend werden in den Streckenverschlüssen und den unteren Schachtbereichen Sorelbeton, im mittleren Schachtbereich Salzbeton und im oberen Schachtbereich Bentonit für die Dichtelemente verwendet /MÜL 11/, /MÜL 12a/. Die Auslegung der oberen Schachtbereiche berücksichtigt zwei Lösungstypen (Süßwasser bis schwach salinar sowie hoch saline Hutgesteinslösungen) und die alterier-

ten Lösungen. Während der vorgesehenen Funktionsdauer wird aufgrund der Dimensionierung der Barrieren mit Opferschichten keine bzw. nur geringe Änderung der Barrierenwirkung angenommen.

Während zukünftiger Kaltzeiten kann es dagegen zu geänderten hydrochemischen Verhältnissen im Deckgebirge kommen, die zu einer Alteration der Schachtverschlüsse und ggf. darauffolgend auch zu einer Alteration der Streckenverschlüsse führen. Die Auswirkungen der anstehenden Lösungen auf die Materialien der Initial-Barrieren werden im FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* und *Alteration von Schacht- oder Streckenverschlüssen* beschrieben.

Das lokale geochemische Milieu im Grubenbau kann sehr unterschiedlich sein, da zahlreiche Wechselwirkungen die thermodynamischen Gleichgewichte und deren Kinetik beeinflussen.

#### **2.13.2.2 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung**

Spannungsänderungen im Gebirge können die druckabhängige Löslichkeit der Minerale im Wirtsgestein oder der zementhaltigen Materialien in den Verschlussbauwerken verändern. Eine gezielte Untersuchung zur Relevanz unter Endlagerbedingungen im Salz wurde noch nicht durchgeführt. Es wird aber erwartet, dass unter Endlagerbedingungen der Einfluss des Druckes auf Auflösungs- und Ausfällungsprozesse vernachlässigbar ist.

**Tab. 2.88** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Quellen des Bentonits
Inlandvereisung in randlicher Lage	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Salzgruskompektion
Thermische Expansion oder Kontraktion	Fluiddruck
Transgression oder Regression	Konvergenz
Diapirismus	Streckenverschlüsse
Sedimentation	Schachtverschlüsse
Erdbeben	Verschlussmaterial*
Glaziale Rinnenbildung	Versatz*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Sonstige Endlagerbehälter
Wirtsgestein	Brennelement-Behälter
Deck- und Nebengebirge	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Sonstige Verschlussbauwerke	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Ausfall eines Dichtpfropfens	Bohrlochverrohrung
Thermochemische Sulfatreduktion	Ausfall einer Bohrlochverrohrung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.13.2.3 Wirtsgestein

Die Löslichkeit nimmt bei den wichtigen gesteinsbildenden Salzmineralen des Wirtsgesteins von Carnallit über Steinsalz zum Anhydrit ab. Da die geologische Barriere zum überwiegenden Teil aus Halit der Staßfurt- und Leinefolge besteht und daher NaCl-gesättigte Lösungen dominieren, ist nicht von einer weiteren Auflösung des Wirtsgesteins auszugehen. Zu betrachten ist die Subrosion (siehe Ausprägung des Initial-FEP *Subrosion*).

Da die aufgefahrenen Grubenbaue im Wirtsgestein Bereiche mit Carnallit oder Anhydrit mit einem Sicherheitsabstand von 50 m umfahren, sind Auflösungs- und Ausfällungsprozesse nur in dem Bereich zu betrachten, in dem Zugangsstrecken von den Schäch-

ten in die Einlagerungsbereiche eine Formation mit Carnallit oder Anhydrit durchqueren.

Auslösende FEP für die Eigenschaften des FEP Wirtsgestein sind nicht bekannt. Die Eigenschaften des FEP Wirtsgestein werden durch seine Bestandteile und verschiedene Wechselwirkungen beeinflusst.

**Tab. 2.89** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion*
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser*	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.13.2.4 Verschlussmaterial

Die Zusammensetzung des Verschlussmaterials bestimmt dessen Löslichkeit. Vorgehene Verschlussmaterialien sind Basaltschotter, Bentonit, Salz- und Sorelbeton. Eine relevante Löslichkeit besteht bei den zementhaltigen Verschlussmaterialien gegenüber den NaCl-gesättigten Lösungen. Auflösungsprozesse an diesen Materialien und Ausfällungsprozesse können aufgrund des unterschiedlichen geochemischen Milieus über lange Zeiträume erwartet werden und werden für vorgesehene Funktionszeiträume mittels Opfermaterialien berücksichtigt.

**Tab. 2.90** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlußmaterial*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Auflösung und Ausfällung
Konvergenz	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Thermische Expansion oder Kontraktion
Quellen des Bentonits	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Kanalisation in Dichtelementen	Glaziale Rinnenbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die Auswirkungen der anstehenden Lösungen auf die zementhaltigen Materialien der Initial-Barrieren werden im FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* und *Alteration von Schacht- oder Streckenverschlüssen* beschrieben.

### 2.13.2.5 Wärmeproduktion

Die Löslichkeit der Salzminerale (Wirtsgestein), der Calciumsilikathydrate (Hochofenzement) und der Magnesiumoxyhydroxychloride (Sorelbeton) ist temperaturabhängig und kann zunehmen oder sinken. Den entscheidenden Einfluss auf den räumlichen und zeitlichen Temperaturverlauf im Endlager hat der radioaktive Zerfall der Radionuklide in den wärmeentwickelnden Abfällen. Andere nennenswert wärmeeintragende Prozesse sind nicht vorhanden. Das Endlagerkonzept sieht vor, dass Temperaturen im Hauptsalz (z2HS) durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 200 °C begrenzt werden.

**Tab. 2.91** Auslösende FEP für das FEP *Wärmeproduktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Radioaktiver Zerfall
-----------------------	----------------------

### 2.13.2.6 Komplexbildung

Abhängig vom geochemischen Milieu kann die Komplexbildung zu einer Erhöhung der Lösungskonzentration von Radionukliden im thermodynamischen Gleichgewicht füh-

ren. Dies ist insbesondere für Nuklide relevant, die sonst nur schwerlösliche Verbindungen bilden.

**Tab. 2.92** Beeinflussende FEP für das FEP *Komplexbildung*

Beeinflussende FEP	Zersetzung von Organika
Lösungen im Grubenbau*	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Inventar: Organika	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Inventar: Sonstige Stoffe*	Thermochemische Sulfatreduktion
Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge*	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

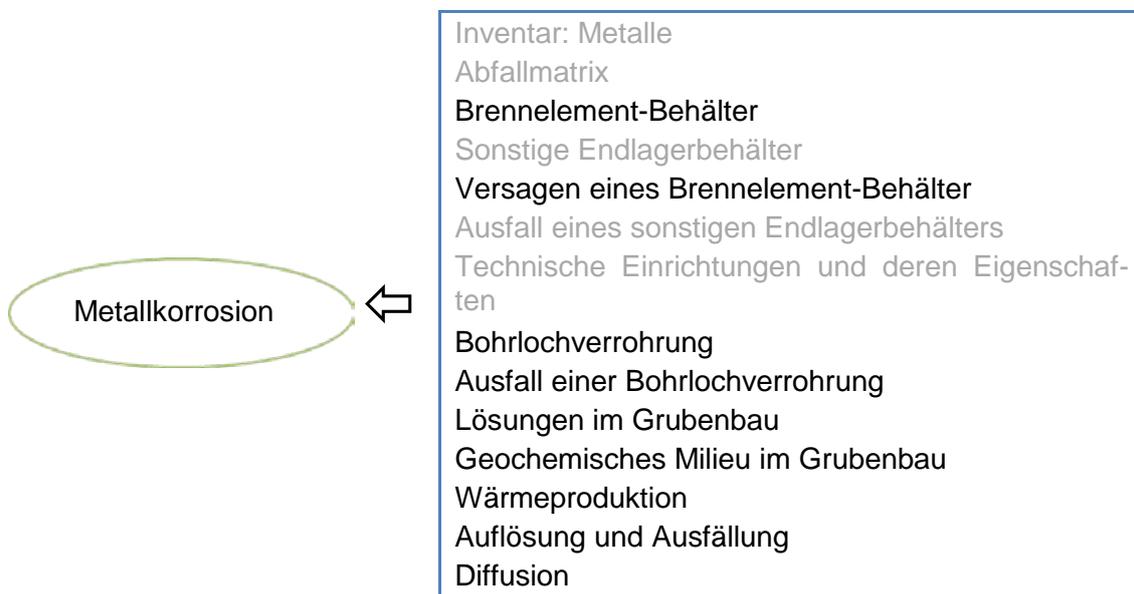
\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.13.3 Nicht berücksichtigte FEP

Die Beeinflussungen auf Auflösungs- und Ausfällungsprozesse durch FEP, die im Deck- und Nebengebirge wirken (*Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge*) oder lediglich zu lokalen Ausfällungen führen (*Verdampfen von Wasser*), werden hier nicht betrachtet, da sie nicht auf die Initial-Barriere wirken. Die Auflösungs- oder Ausfällungsprozesse im Versatz (*Versatz*) oder sonstiger Stoffe (*Inventar: Sonstige Stoffe*) im Endlager wird systematischerweise ebenfalls nicht betrachtet, da es sich nicht um Initial-Barrieren handelt. Im Falle des Versatzes mit Salzgrus kann von einem weitgehenden thermodynamischen Gleichgewicht mit den anstehenden Lösungen ausgegangen werden, sodass nur ein vernachlässigbarer Einfluss auf den Versatz erwartet wird. Der Einfluss der Auflösungs- und Ausfällungsprozesse weiterer Komponenten auf die Löslichkeit von Materialien von Initial-Barrieren ergibt sich über das geochemische Milieu.

## 2.14 Metallkorrosion

Die Herleitung einer Ausprägung der Metallkorrosion durch die vorhandene Feuchte im Versatz, der Gebirgsfeuchte und möglicherweise migrierender Lösungen im Wärmefeld der Abfälle wird für die Initial-Barriere „Brennelement-Behälter“ beschrieben. Die Metallkorrosion betrifft POLLUX- bzw. CASTOR-Behälter (Varianten B1 und B2) sowie die BSK und die die BSK mechanisch schützende Bohrlochverrohrung (Variante C). Die Ausprägung kann für die jeweilig verwendeten Materialien durch eine Rate, Ablauf (flächige Korrosion, Lochkorrosion, Produkte usw.) mit einem erwarteten Wert oder Wertebereich beschrieben werden.



**Abb. 2.14** Ausprägung der Metallkorrosion

Die Auslegung der Behälter wird so erfolgen, dass der im Regelwerk /BMU 10/ geforderte Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit der Behälter über einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren gewährleistet ist.

Die begrenzt vorhandenen Lösungsmengen lassen die flächenhafte Korrosion in verhältnismäßig kurzer Zeit erliegen. /MÜL 09/ geben z. B. für POLLUX-Außenbehälter (Material GGG40) für einen Zeitraum von 1.430 Jahren eine Eindringtiefe von 21 mm an. Die mittlere Korrosionsrate für diesen Zeitraum beträgt damit etwa 15 µm/a. Ähnliche Werte für GGG40 ermittelten /BEC 04/ bei Experimenten in der Asse. In Laborexperimenten konnten bei hohen Temperaturen und hohen NaCl-Konzentrationen bei Gusseisen Raten für flächige Korrosion bis zu 60 µm/a festgestellt werden. Lochkorro-

sion wurde für Gusseisen weder in den Versuchen in der Asse noch im Labor nachgewiesen. Diese Ergebnisse können als Orientierung für eine Systementwicklung zu Grunde gelegt werden. Die Bandbreiten aller verwendeten Materialien müssen noch für Endlagerbedingungen im Salzstock Gorleben abgeleitet werden.

Nach der zu gewährleistenden Funktionsdauer ist ein Verlust der Integrität (Einschluss von Aerosolen) der POLLUX- bzw. CASTOR-Behälter sowie der BSK z. B. durch lokale Korrosionseffekte (Lochkorrosion) in Abhängigkeit von Material und geochemischen Milieu möglich. Generell ist zu berücksichtigen, dass die mechanische Stabilität der Behälter (bei der Bohrlochlagerung auch der Bohrlochverrohrung) durch Korrosionsprozesse ungünstig beeinflusst werden kann.

#### **2.14.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

#### **2.14.2 Beeinflussende FEP**

##### **2.14.2.1 Brennelement-Behälter**

Die Eigenschaften der Brennelement-Behälter wirken sich auf die Ausprägung, d. h. Rate und Ablauf, der Korrosion aus. Daher ist das beeinflussende FEP *Inventar: Metalle* als Hauptbestandteil der Behälter wichtig für die Ausprägung der Metallkorrosion. Auch das FEP *Spannungsänderung und -umlagerung* wirkt auf den Brennelementbehälter ein und somit auf den Ablauf einer Metallkorrosion.

**Tab. 2.93** Beeinflussende FEP für das FEP *Brennelement-Behälter*

Beeinflussende FEP	
Zersetzung von Organika	Thermische Expansion und Kontraktion
Salzgruskompaktion	Radiolyse
Metallkorrosion	Spannungsänderung und Spannungs- umlagerung
Materialversprödung durch Wasserstoff- aufnahme	Versagen eines Brennelement- Behälters*
Inventar: Metalle	Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die POLLUX-Behälter der Variante B1 bestehen aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter ist aus Feinkornbaustahl (Werkstoff Stahl 15MnNi6.3, 1.6210) gefertigt und hat eine Wandstärke von 160 mm. Er wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen (ebenfalls Werkstoff Stahl 15MnNi6.3, 1.6210). Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben eingesetzt werden kann. Die Büchsen / Korb sind aus Edelstahl (1.4541) mit Borstahlblech beplankt, z. T. mit Kupfer beschichtet. Der Außenbehälter ist aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff EN-GJS-400-15U, 0.7040) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Da er keine Dichtfunktion zu übernehmen hat, wird er mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Zur Handhabung sind am Behälterkörper oben und unten Tragzapfen aus Edelstahl X5CrNi13.4 (1.4313) und zur Wärmeabfuhr Kühlrippen aus Aluminium (EN AW 6060) angebracht.

Für die Endlagerung der Forschungs- und Prototypreaktor-Brennelemente sind Behälter des Typ CASTOR THTR/AVR, CASTOR KNK und CASTOR MTR 2 vorgesehen. Die CASTOR-Behälter der Typen THTR/AVR und KNK bestehen aus einem zylindrischen Grundkörper aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040) und verfügen über einen Primärdeckel aus Schmiedestahl (TSE 355) und einen Sekundärdeckel aus unlegiertem Stahl (Werkstoff St 52-3). Zur Handhabung ist der Behälter oben und unten jeweils mit zwei Tragzapfen aus Schmiedestahl (TSE 355) ausgerüstet.

Der CASTOR MTR 2 besteht aus einem einteiligen, dickwandigen zylindrischen Behälterkörper mit Boden aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Werkstoff 0.7040). Das obere Zylinderende wird durch einen 280 mm starken Primärdeckel (Werkstoff 1.0566 oder 1.4313) und einen 60 mm starken Sekundärdeckel (Werkstoff 1.0566) verschlossen.

Die Brennelemente werden im Behälterinnenraum in Tragkörben aus Aluminium angeordnet.

Bei der Variante B2 werden die POLLUX-Brennelement-Behälter durch Transport- und Lagerbehälter der Typen CASTOR V/19, CASTOR V/52 und CASTOR 440/84 ersetzt.

Diese Behälter bestehen aus einem monolithischen Körper aus Sphäroguss (EN-GJS-400-15U) in Form eines einseitig geschlossenen Hohlzylinders, einem Tragkorb zur Aufnahme der Brennelemente und dem übereinander angeordneten Verschlussystem (Primär- und Sekundärdeckel) sowie einer Schutzplatte. Primär- und Sekundärdeckel sind aus Edelstahl (1.4313) X5CrNi13.4 gefertigt und werden mit dem Behälterkörper fest verschraubt. Außerdem sind zur Handhabung oben und unten am Behältermantel jeweils paarweise Tragzapfen angeschraubt.

Die Brennstabkokille BSK der Variante C besteht aus einem konischen Behälterkörper mit 50 mm Wandstärke und einem angespressten oder angeschweißten Boden. Der Behälterkörper besteht wie der Primär- und Sekundärdeckel der BSK aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210).

#### **2.14.2.2 Versagen eines Brennelement-Behälters**

Die Behälterauslegung und Qualitätssicherungsmaßnahmen sowie technische Vorsorgemaßnahmen und betriebliche Regelungen bei Transport und Handhabung der Behälter soll sicherstellen, dass der im Regelwerk /BMU 10/ geforderte Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren grundsätzlich gewährleistet sind. Das Versagen eines oder mehrerer Brennelementbehälter wird statistisch betrachtet, z. B. auf Grund unerkannter Produktionsfehler. Die beeinflussenden FEP wirken sich dann ebenfalls auf die Ausprägung der Metallkorrosion aus.

Erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer von 500 Jahren ist ein Versagen der Brennelement-Behälter durch chemische und/oder mechanische Einwirkungen zu erwarten /MÜL 08/, /MÜL 09/.

**Tab. 2.94** Beeinflussende FEP für das FEP *Versagen eines Brennelement-Behälters*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Metallkorrosion	Spannungsänderung und Spannungs- umlagerung
Materialversprödung durch Wasserstoff- aufnahme	Brennelement-Behälter

### 2.14.2.3 Lösungen im Grubenbau

Die Verfügbarkeit von Feuchtigkeit ist eine notwendige Voraussetzung für die Metallkorrosion. Im Referenzszenarium sind die für die Korrosion verfügbaren Feuchtemengen begrenzt. /DÖR 12/ beziffert die mögliche Restfeuchte in Behältern.

Die Gebirgsfeuchte im Hauptsalz der Staßfurt-Serie beträgt 0,012 bis 0,017 Gew.-% /BOR 08/. Die Feuchte des trockenen Salzgrusversatzes entspricht jener des aufgefahrenen Salzgesteins, der Feuchtegehalt für feuchten Salzgrusversatz beträgt ca. 0,6 Gew.-% in den Richtstrecken. Der Quarzsand, der in die Einlagerungsbohrlöcher (Variante C) zur Verfüllung des Ringraums zwischen Behälter und Verrohrung sowie zur Trennung der Behälter eingebracht wird, hat als getrockneter Sand eine Restfeuchte von ca. 0,2 Gew.-% /BOL 12/.

Nach Verschluss des Endlagers können Lösungen über den Schacht zutreten. Weitere Möglichkeiten ergeben sich aus dem Zutritt aus Lösungsreservoirs aus Schichten der Leine-Folge und durch bei den wärmeentwickelnden Abfällen durch Migration im Wärmefeld der Abfälle.

**Tab. 2.95** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lösungen im Grubenbau*

<b>Auslösende FEP</b>	Metallkorrosion
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Korrosion der Brennstoffmatrix
<b>Beeinflussende FEP</b>	Auflösung und Ausfällung*
Radiolyse	Inventar: Sonstige Stoffe
Verdampfen von Wasser	Versatz
Wärmeproduktion*	Verschlussmaterial
Zersetzung von Organika	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Thermochemische Sulfatreduktion	Abfallmatrix

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die Lösungen im Grubenbau bzw. im Nahfeld der Behälter sind zudem durch einen möglichen Verbrauch von Wasser durch chemische Prozesse (vor allem Zersetzungs- und Korrosionsprozesse) oder Transport durch Verdampfen sowie durch Wasserbildung bei der thermochemischen Sulfatreduktion veränderlich und beeinflussen die Ausprägung.

#### 2.14.2.4 Geochemisches Milieu im Grubenbau

Der Umfang und die Geschwindigkeit der Korrosion wechselwirken stark mit dem geochemischen Milieu. Laborexperimente zeigen eine starke Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit vom pH-Wert oder dem Chloridgehalt der Lösung. Im Referenzszenarium ist das geochemische Milieu der Restfeuchte in den Behältern und im Versatz und der aus dem Gebirge migrierenden Lösungen relevant. Daher wird für das Referenzszenarium eine gesättigte NaCl-Lösung als bestimmendes geochemisches Milieu für eine Metallkorrosion erwartet. Weitere beeinflussende FEP, wie z. B. Sulfide, die durch thermochemische oder mikrobielle Sulfatreduktion gebildet werden und zur Ausfällung von Metallsulfiden führen, können das geochemische Milieu und damit die Ausprägung der Metallkorrosion verändern.

**Tab. 2.96** Beeinflussende FEP für das FEP *Geochemisches Milieu im Grubenbau*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Lösungen im Grubenbau	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Gasmenge im Grubenbau	Zersetzung von Organika
Inventar: Metalle	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Inventar: Organika	Wärmeproduktion*
Inventar: Sonstige Stoffe	Diffusion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Advektion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Metallkorrosion	Thermochemische Sulfatreduktion
Korrosion der Brennstoffmatrix	Komplexbildung
Korrosion von Glas	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.14.2.5 Auflösung und Ausfällung

Mit einer Metallkorrosion können Auflösungs- und Ausfällungsprozesse verbunden sein. Korrosionsprodukte (z. B. Eisenhydroxide) können schwerlösliche Deckschichten ausbilden und die Korrosion verlangsamen, ggf. sogar zum Erliegen bringen. Die Bildung von Sulfiden kann die Metallkorrosion beschleunigen und so die Ausprägung verändern. Komplexbildung und das geochemische Milieu wechselwirken ebenfalls über Auflösungs- und Ausfällungsprozesse mit der Metallkorrosion. Der Einfluss dieser Zusammenhänge auf die derzeit angenommene Ausprägung der Metallkorrosion ist nicht abschließend untersucht. Die übrigen FEP werden als untergeordnet hinsichtlich eines Einflusses auf die Ausprägung der Metallkorrosion angenommen.

**Tab. 2.97** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Auflösung und Ausfällung*

<b>Auslösende FEP</b>	
Lösungen im Grubenbau	Geochemisches Milieu im Grubenbau
<b>Beeinflussende FEP</b>	Verschlussmaterial
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Versatz
Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge	Inventar: Sonstige Stoffe
Wirtsgestein	Verdampfen von Wasser
Wärmeproduktion*	Komplexbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.14.2.6 Wärmeproduktion

Chemische Reaktionen, wie die Metallkorrosion, sind in der Regel temperaturabhängig und werden mit zunehmender Temperatur beschleunigt.

**Tab. 2.98** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Wärmeproduktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Radioaktiver Zerfall
-----------------------	----------------------

#### 2.14.2.7 Diffusion

**Tab. 2.99** Beeinflussende FEP für das FEP *Diffusion*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Porosität	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
Geochemisches Milieu im Grubenbau	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Auch Diffusionsprozesse steuern die Ausprägung der Metallkorrosion. Sie können Edukte zuführen und Produkte abführen. Porosität, Strömungsvorgänge und das geochemische Milieu können die Ausprägung der Metallkorrosion über das FEP *Diffusion* beeinflussen.

### 2.14.2.8 Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Die Menge, Zusammensetzung und Platzierung der in den Einlagerungsstrecken verbleibenden Bergwerkseinrichtungen, z. B. Anker, beeinflussen die Ausprägung der Metallkorrosion der Brennelement-Behälter. Die Metallkorrosion an technischen Einrichtungen kann die verfügbaren Lösungen im Grubenbau reduzieren.

**Tab. 2.100** Beeinflussende FEP für das FEP *Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Diapirismus
Inventar: Metalle	Inventar: Organika
Inventar: Sonstige Stoffe	Konvergenz
Salzgruskompaktion	Metallkorrosion
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Zersetzung von Organika
Thermische Expansion oder Kontraktion	Spannungsänderung- und Spannungsumlagerung

### 2.14.2.9 Bohrlochverrohrung

Die Bohrlochverrohrung kann die Ausprägung der Metallkorrosion an den Brennelementbehältern durch das Metallinventar, die Ausprägung der Metallkorrosion an der Verrohrung selbst, Materialversprödung und den Ausfall der Bohrlochverrohrung beeinflussen.

Die Einlagerungsbohrlöcher sollen in der Variante C eine Verrohrung mit einer Länge von 300 m von der Einlagerungssohle (870 m) und mit einem Innendurchmesser der Verrohrung von 76 cm (für Leistungsreaktor-Brennelemente) und 88 cm (Forschungsreaktor-Brennelemente) erhalten. Der Außendurchmesser der Verrohrung wird 86 cm bzw. 98 cm betragen. Die Wandstärke von 5 cm ergibt sich aus thermomechanischen Auslegungsrechnungen für den Werkstoff GGG40 (EN-GJS-400-15) /BOL 12/. Die Verrohrung wird beidseitig durch Stahldeckel verschlossen. Die Verrohrung soll bei der Einbringung laugendicht verschlossen werden.

Da ein mechanischer Ausfall möglich ist, kann eine Korrosion der BSK unterstellt werden. Die Korrosion der Verrohrung kann die verfügbaren Lösungen im Grubenbau reduzieren.

**Tab. 2.101** Beeinflussende FEP für das FEP *Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Diapirismus
Inventar: Metalle	Erdbeben
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Konvergenz
Wärmeproduktion*	Metallkorrosion
Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Thermische Expansion oder Kontraktion	Spannungsänderung- und Spannungsumlagerung
Versatz	Sonstige Verschlussbauwerke
Fluiddruck	Ausfall einer Bohrlochverrohrung*
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Radiolyse

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.14.2.10 Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Das FEP beschreibt den Verlust der mechanischen Stabilität einer Bohrlochverrohrung durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen bzw. eine Kombination verschiedener Einwirkungen. Der Ausfall der Bohrlochverrohrung ermöglicht den Zutritt von Lösung in unterschiedlichem Maße und verändert so die Ausprägung der Metallkorrosion an der BSK.

**Tab. 2.102** Beeinflussende FEP für das FEP *Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Diapirismus
Fluiddruck	Bohrlochverrohrung
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Konvergenz
Spannungsänderung- und Spannungsumlagerung	Metallkorrosion

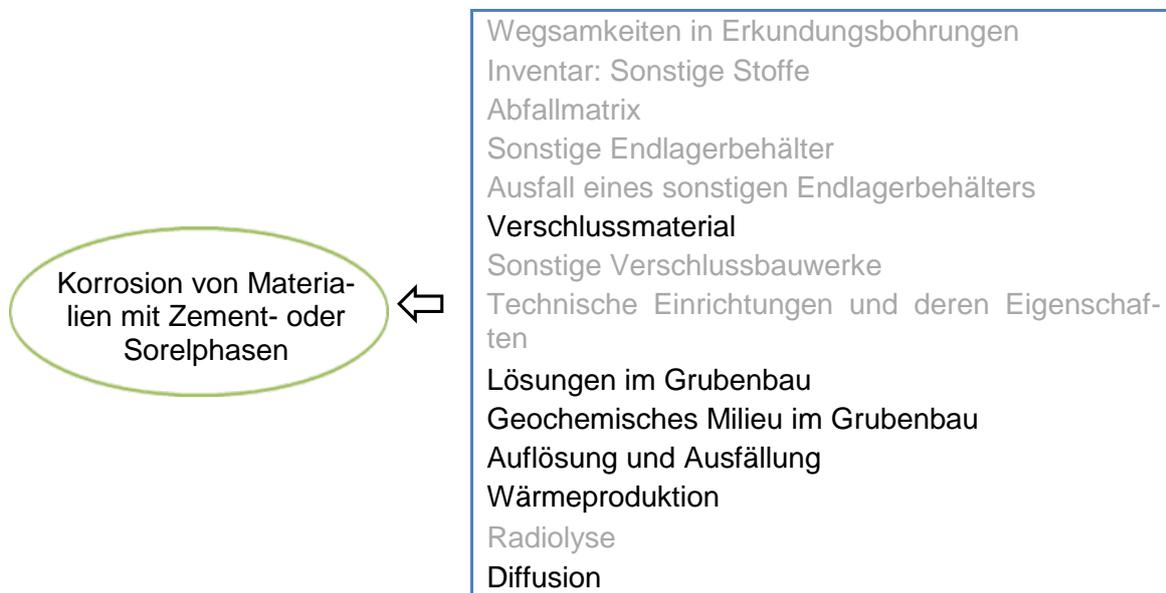
#### 2.14.3 Nicht berücksichtigte FEP

Die Beeinflussungen auf die Ausprägung der Metallkorrosion durch und auf die FEP *Abfallmatrix*, *Sonstige Endlagerbehälter*, *Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters* sind hier nicht zu berücksichtigen. Der Grund dafür ist, dass diese Abfallgebinde von

den Brennelement-Behältern räumlich getrennt sind und somit für die Ausprägung der Metallkorrosion auf die Brennelement-Behälter vernachlässigbar sind. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird das FEP *Inventar: Metalle*, da die als Randbedingung über die FEP *Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften* sowie *Bohrlochverrohrung* bereits berücksichtigt ist.

## 2.15 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Die verwendeten Materialien mit Zement- oder Sorelphasen für die Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“ und „Streckenverschlüsse“ sind Sorelbeton und Salzbeton. Für Streckenverschlüsse und Dichtpfropfen sowie für das untere Dichtelement und Widerlager der Schachtverschlüsse ist Sorelbeton vorgesehen. Salzbeton wird für die mittleren Dichtelemente und Widerlager der Schachtverschlüsse verwendet. Die Ausprägung bezieht sich auf die Geschwindigkeit und Umfang der Korrosion der beiden unterschiedlichen Materialien. Ein Wert für die Ausprägung kann nicht angegeben werden, jedoch sind Gleichgewichtsmodellierungen möglich, die eine Stabilität gegenüber verschiedenen Lösungen indizieren können.



**Abb. 2.15** Ausprägung der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Die Korrosion der zementhaltigen Komponenten ist langzeitsicherheitsrelevant, da über sehr lange Zeiträume davon auszugehen ist, dass zementhaltige Materialien korrodiert werden. Der Ablauf der Korrosion von zementhaltigen Bestandteilen ist abhängig vom geochemischen Milieu der Lösungen, die mit diesen Materialien in Kontakt kommen. Für das zutretende Grundwasser über dem Salzstock ist zunächst anzunehmen, dass es hohe NaCl-Konzentrationen enthält, so dass das grundwasserseitige Dichtelement aus Salzbeton im Schachtverschluss gegenüber einer Korrosion für den Funktionszeitraum stabil ist. Nach einer zukünftigen Kaltzeit kann das Deckgebirge umgestaltet sein und ein anderes Grundwasser vorhanden sein, das zu einer höheren Korrosion der

zementhaltigen Komponenten führt. Jedoch bestehen dann keine Anforderungen mehr an die Funktion der Schachtverschlüsse.

Zu den magnesium- und sulfatdominierten Gesteinsschichten (Hauptanhydrit, Carnallit) sind jeweils Dichtelemente aus Sorelbeton vorgesehen, so dass Wässer, die mit diesen Gesteinen in Kontakt standen, nicht korrodierend wirken können.

Während der Funktionsdauer der Verschlussbauwerke (50.000 Jahre) ist nicht von einer relevanten Veränderung der hydraulischen oder mechanischen Eigenschaften durch Korrosion auszugehen.

#### **2.15.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

#### **2.15.2 Beeinflussende FEP**

##### **2.15.2.1 Diffusion**

Diffusion ist der entscheidende Transportprozess bei der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen, da dadurch für den Abtransport der Korrosionsprodukte gesorgt wird. Eine Differenzierung der beeinflussenden FEP ist nicht erforderlich, da eine Diffusion nur bei einem Konzentrationsgefälle stattfindet, das durch externe Transportvorgänge erhalten wird.

**Tab. 2.103** Beeinflussende FEP für das FEP *Diffusion*

Beeinflussende FEP	
Porosität	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
Geochemisches Milieu im Grubenbau	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

### 2.15.2.2 Wärmeproduktion

Die Temperatur, die aus der Wärmeproduktion resultiert, beeinflusst Korrosionsprozesse. In der Regel steigt mit zunehmender Temperatur die Korrosionsgeschwindigkeit.

**Tab. 2.104** Auslösende FEP für das FEP *Wärmeproduktion*

Auslösende FEP	Radioaktiver Zerfall

### 2.15.2.3 Geochemisches Milieu im Grubenbau

Das geochemische Milieu ist eine entscheidende Größe für die Ausprägung der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen. So ist der Salzbeton gegenüber begrenzt vorhandenen gesättigten NaCl-Lösungen langzeitstabil, wird aber von magnesiumreichen Lösungen angegriffen, insbesondere wenn auch Sulfat in der Lösung anwesend ist /KIE 98/. Sorelbeton ist gegenüber magnesiumreichen Lösungen stabil, in NaCl-gesättigten Lösungen kommt es in geringem Umfang zu Umbildungsprozessen /RAU 10/.

**Tab. 2.105** Beeinflussende FEP für das FEP *Geochemisches Milieu im Grubenbau*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Lösungen im Grubenbau	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Gasmenge im Grubenbau	Zersetzung von Organika
Inventar: Metalle	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Inventar: Organika	Wärmeproduktion
Inventar: Sonstige Stoffe	Diffusion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Advektion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Metallkorrosion	Thermochemische Sulfatreduktion
Korrosion der Brennstoffmatrix	Komplexbildung
Korrosion von Glas	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

#### 2.15.2.4 Auflösung und Ausfällung

Auflösungsprozesse sind ein wesentlicher Bestandteil der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen. So erfolgt zum Beispiel ein Calcium-Magnesium-Austausch auf Grund der unterschiedlichen Löslichkeit der jeweiligen Salze. Weitere Auflösungseffekte auf die zementhaltigen Komponenten der Initial-Barrieren werden im Kapitel 2.13 beschrieben.

**Tab. 2.106** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Auflösung und Ausfällung*

<b>Auslösende FEP</b>	
Lösungen im Grubenbau*	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Verschlussmaterial*
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Versatz
Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge	Inventar: Sonstige Stoffe
Wirtsgestein	Verdampfen von Wasser
Wärmeproduktion*	Komplexbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.15.2.5 Lösungen im Grubenbau

Die Anwesenheit von Lösung ist eine notwendige Voraussetzung für die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen. Unter den gegebenen Prämissen sind im Referenzszenarium die für die Korrosion verfügbaren Feuchtemengen für die Streckenschlüsse begrenzt. Die Schachtverschlüsse stehen dagegen mit dem Grundwasser über dem Salzstock in Kontakt.

**Tab. 2.107** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lösungen im Grubenbau*

<b>Auslösende FEP</b>	Metallkorrosion
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Korrosion der Brennstoffmatrix
<b>Beeinflussende FEP</b>	Auflösung und Ausfällung*
Radiolyse	Inventar: Sonstige Stoffe
Verdampfen von Wasser	Versatz
Wärmeproduktion*	Verschlussmaterial*
Zersetzung von Organika	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Geochemisches Milieu im Grubenbau*
Thermochemische Sulfatreduktion	Abfallmatrix

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.15.2.6 Verschlussmaterial

Die verwendeten zement- bzw. sorelhaltigen Materialien für die Verschlussbauwerke sind:

- Sorelbeton A1 (MgO als Bindemittel (11,3 %), Steinsalzgrus als Zuschlagstoff (63,7 %) werden mit  $MgCl_2$ -Lösung angemischt (25 %). Der Sorelbeton A1 wird für Streckenverschlüsse und Verschlusspfropfen sowie für das untere Dichtelement und Widerlager der Schachtverschlüsse vorgesehen.
- Salzbeton (Hochofenzement (CEM III / B 32,5 N-LH / HS / NA) als Bindemittel (18,3 %), Steinsalzgrus als Zuschlagstoff (72,65 %) und gesättigte NaCl-Lösung zum Anmischen (10 %). Der Salzbeton wird für die mittleren Dichtelemente und Widerlager der Schachtverschlüsse verwendet.

**Tab. 2.108** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

Beeinflussende FEP	
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Auflösung und Ausfällung*
Konvergenz	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Thermische Expansion oder Kontraktion
Quellen des Bentonits	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Kanalisation in Dichtelementen	Glaziale Rinnenbildung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.15.3 Nicht berücksichtigte FEP

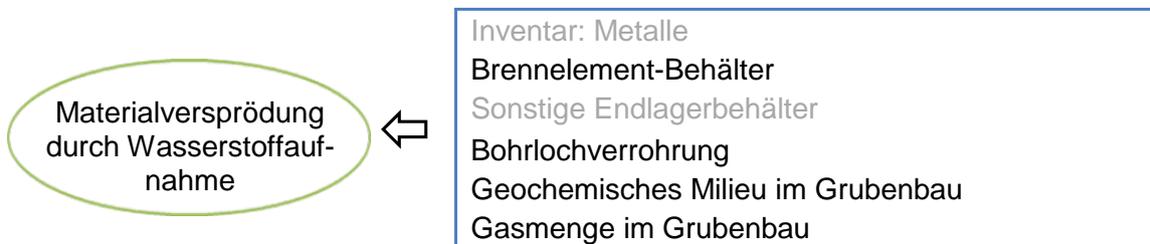
Die in den sonstigen Verschlussbauwerken eingesetzten Materialien werden hier nicht betrachtet, da sie keine Bestandteile einer Initial-Barriere sind. Die Beeinflussung der FEP *Sonstige Endlagerbehälter, Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters, Abfallmatrix, Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften* sowie *Sonstige Verschlussbauwerke* entfällt daher. Eine Beeinflussung auf die Korrosion erfolgt indirekt über das geochemische Milieu. Die Radiolyse spielt nur bei zementhaltiger Abfallmatrix eine Rolle.

Ebenfalls nicht berücksichtigt wird das FEP Inventar: Sonstige Stoffe, da die entsprechende Beeinflussung auf die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen über das FEP *Verschlussmaterial* behandelt wird.

Das FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* beschreibt einen Spezialfall, da hier die Verfüllung der Erkundungsbohrungen mit Magnesiabinder beschrieben wird. Das Auftreten von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen ist als weniger wahrscheinlich eingestuft und wird daher nicht berücksichtigt.

## 2.16 Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Die Versprödung metallischer Bestandteile durch Wasserstoff, der durch Metallkorrosion entstehen kann, ist ein Prozess, der auch unter Endlagerbedingungen möglich ist. Die Versprödung der metallischen Komponenten der Brennelement-Behälter, d. h. bei der Streckenlagerung die POLLUX- oder CASTOR-Behälter, bei der Bohrlochlagerung die BSK und die Bohrlochverrohrung, beeinträchtigt deren mechanische Stabilität. Die Versprödung anderer metallischer Komponenten im Endlager ist nicht relevant. Die Beeinträchtigung der mechanischen Stabilität der Brennelement-Behälter und der Bohrlochverrohrung ist somit die Ausprägung des *FEP Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* und hat einen Einfluss auf deren einschlusswirksamen Eigenschaften.



**Abb. 2.16** Ausprägung des *FEP Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*

Das Verspröden der metallischen Komponenten der Behälter führt nicht direkt zum Verlust ihrer Integrität. Durch Versprödung können geringere Gebirgsspannungszustände als in der Auslegung angenommen zu Versagen der Behälter oder Ausfall der Bohrlochverrohrung führen.

Nach Stand von Wissenschaft und Technik ist die Versprödung von Metallen ein bekannter Prozess und sollte aufgrund der denkbaren Wasserstoffentwicklung im Endlager als Ursache für ein Versagen der Behälter in Betracht gezogen werden. Die Ausprägung (Versprödungsgrad) ergibt sich letztlich aus der Entwicklung des Endlagersystems (Verfügbarkeit von Wasserstoff). Der Zusammenhang mit einem Versagen der Behälter bzw. Ausfall der Bohrlochverrohrung lässt sich ohne weitere Untersuchungen zurzeit nicht bewerten.

### 2.16.1 Auslösende FEP:

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.16.2 Beeinflussende FEP

#### 2.16.2.1 Brennelement-Behälter

Der Aufbau der POLLUX-, CASTOR-Behälter und BSK (siehe FEP *Behälter*) beeinflusst die Versprödung. Wichtig sind insbesondere die Materialien Gusseisen als auch Feinkornbaustahl. Für beide Werkstoffe ist Wasserstoffversprödung bekannt, z. B. /BAR 11/. Die Versuchsbedingungen lassen sich nicht auf Endlagerbedingungen im Salz übertragen.

**Tab. 2.109** Beeinflussende FEP für das FEP *Brennelement-Behälter*

Beeinflussende FEP	
Zersetzung von Organika	Thermische Expansion und Kontraktion
Salzgruskompaktion	Radiolyse
Metallkorrosion	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Versagen eines Brennelement-Behälters
Inventar: Metalle	Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Die Metallkorrosion unter Wasserstoffbildung findet unter Wechselwirkung mit der parallel ablaufenden Versprödung, dem Versagen des Brennelementbehälters bzw. Ausfall einer Bohrlochverrohrung statt.

### 2.16.2.2 Bohrlochverrohrung

Die Bohrlochverrohrung wird aus Gusseisen (GGG40) hergestellt. Ob dieses Material unter Endlagerbedingungen durch Wasserstoff verspröden kann, ist noch zu klären.

**Tab. 2.110** Beeinflussende FEP für das FEP *Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Diapirismus
Inventar: Metalle	Erdbeben
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Konvergenz
Wärmeproduktion	Metallkorrosion
Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Thermische Expansion oder Kontraktion	Spannungsänderung- und Spannungsumlagerung
Versatz	Sonstige Verschlussbauwerke
Fluiddruck	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Radiolyse

### 2.16.2.3 Gasmenge im Grubenbau

**Tab. 2.111** Beeinflussende FEP für das FEP *Gasmenge im Grubenbau*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Gasbildung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Die Metallkorrosion der Behälter bildet Wasserstoff in der Nachverschlussphase und kann zu einer Versprödung der metallischen Behältermaterialien durch Wasserstoff führen. Dies ist abhängig von der Wasserstoffmenge in der Umgebung eines Behälters, die wiederum abhängig ist vom Verlauf der Gasbildung und von Strömungsvorgängen des Gases.

### 2.16.2.4 Geochemisches Milieu im Grubenbau

Das geochemische Milieu beeinflusst aufgrund der physikalischen-chemischen Zusammenhänge das Eindringen vorhandenen Wasserstoffes in die Metallstruktur der Behälter und somit die Versprödung. Lediglich das FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung* wird als vernachlässigbar in diesem Zusammenhang angesehen.

**Tab. 2.112** Beeinflussende FEP für das FEP *Geochemisches Milieu im Grubenbau*

Beeinflussende FEP	
Lösungen im Grubenbau	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Gasmenge im Grubenbau*	Zersetzung von Organika
Inventar: Metalle	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Inventar: Organika	Wärmeproduktion
Inventar: Sonstige Stoffe	Diffusion
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Advektion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Metallkorrosion	Thermochemische Sulfatreduktion
Korrosion der Brennstoffmatrix	Komplexbildung
Korrosion von Glas	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.16.3 Nicht berücksichtigte FEP

Zu betrachten ist der Einfluss auf die POLLUX- oder CASTOR-Behälter sowie die BSK und der Bohrlochverrohrung. Die beeinflussenden FEP *Inventar: Metalle* und *Sonstige Endlagerbehälter* entfallen daher bei der Betrachtung bzw. wirken über mehrere Ebenen.

## 2.17 Auflockerungszone

Eine Auflockerungszone (ALZ) ist ein konturnah begrenzter und geschädigter Bereich des einen Grubenraum umgebenden Gebirges, wobei dessen Schädigung und die daraus resultierende Permeabilität durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes und die damit verbundene Überschreitung der Dilatanzgrenze entstanden ist. Die Auflockerungszone kann aufgrund der Ausbildung einer (Sekundär-) Permeabilität um die Grubenbaue einen potentiellen Fließpfad für das Eindringen von Fluiden in das Endlager und einen Ausbreitungspfad für das Auspressen kontaminierter Fluide bilden. Es wird unterstellt, dass sich die Risse der Auflockerungszone während der Nachverschlussphase durch die Konvergenz dauerhaft verschließen und verheilen.

Das FEP kann die Funktion der Initial-Barrieren „Schachtverschluss“ und „Streckenverschluss“ beeinträchtigen.

Die Ausprägung des FEP wird durch eine hydraulische Durchlässigkeit beschrieben, die durch Modellrechnungen bzw. für Modellrechnungen zu ermitteln ist.

Variante B1: Bei der Auffahrung des Endlagerbergwerkes wird der Primärspannungszustand im Salzgebirge verändert. Abhängig von der Temperatur und der Mineralogie des Salzgebirges sowie durch Spannungsüberlagerungen aus benachbarten Hohlräumen kann sich das Salz über das reine Kriechen hinaus deformieren und wird an der Kontur bei Überschreiten der Dilatanzgrenze durch Rissbildung eine *Auflockerungszone* ausbilden. Die gebildeten Risse können netzartig miteinander verbunden sein. Daher wird bei der Auffahrung darauf geachtet, dass sich die Auflockerungszonen der verschiedenen Grubenbaue nicht überlagern und in Wechselwirkung treten können. Die Mächtigkeit dieser Auflockerungszone ist in der Regel kleiner als der Streckendurchmesser und beschränkt sich auf wenige Dezimeter bis zu wenigen Metern. Die Auflockerungszone wird vor der Errichtung von *Schachtverschlüssen* und *Streckenverschlüssen* in den Einbaupositionen der Dichtelemente so weit wie möglich entfernt. Die möglicherweise verbleibende Restschädigungszone kann bei Bedarf durch Injektionen abgedichtet werden.

Wichtige Randbedingungen für die Ausprägung der Auflockerungszone sind das *Wirtsgestein*, dessen Mineralogie, Struktur und Textur die Spannungsverteilung bestimmen, sowie die Eigenschaften von *Versatz* und *Verschlussmaterialien*, die die Druckfestig-

keit der Verfüllung bzw. der Barriere und damit den Stützdruck bestimmen, mit dem diese dem Gebirgsdruck entgegen wirken.

Der vor allem aus der Gasbildung resultierende Anstieg des *Fluiddrucks* kann zum Aufreißen von Rissen in der *Auflockerungszone* um die Verschlussbauwerke führen.

Alle Änderungen der Spannungsverhältnisse im Gebirge durch *Erdbeben*, Salzaufstieg (*Diapirismus*) oder Änderungen der Gebirgsauflasten durch Erhöhung / Erniedrigung der Sedimentmächtigkeiten wirken sich auf die *Konvergenz* damit auch auf die *Auflockerungszone* aus. Spannungserhöhungen können dabei die Verheilung der Risse fördern, Spannungsreduzierungen zu einem Aufreißen von Rissen führen.

Kaltzeitliche Einwirkungen (*Inlandvereisung*, *Glaziale Rinnenbildung*) treten erst zu späten Zeiten auf, zu denen die *Salzgruskompaktion* im vollständig verfüllten Grubengebäude sowie das Schließen und Verheilen der *Auflockerungszone* abgeschlossen sind. Daher sind diese Einwirkungen nur von untergeordneter, sicherheitstechnischer Bedeutung.

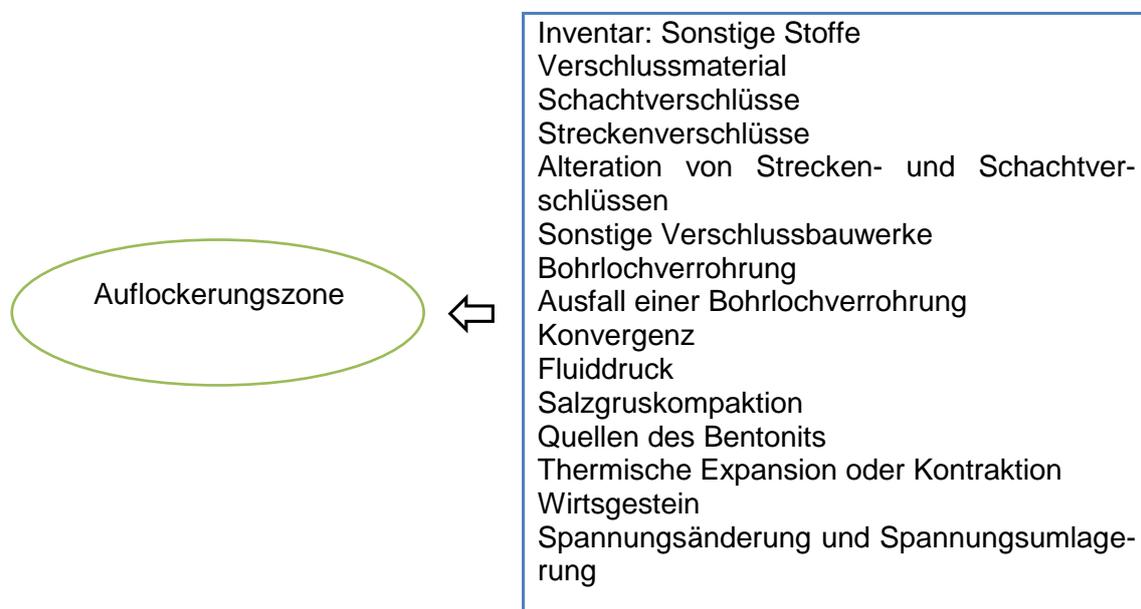
Variante B2: Die Ausprägung der *Auflockerungszone* hängt – außer von den bergbaulichen (Auffahrungstechnik) und geologischen Aspekten – von der Geometrie der Grubenräume und der *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Gebirge ab. Die Grubenräume der Variante B2 sind in den Einlagerungsfeldern (horizontale Einlagerungsbohrlöcher, große Einlagerungsnischen) deutlich anders konfiguriert als in der Variante B1 /BOL 12/. Diese Grubenraumgeometrie und die andere Verteilung der eingebrachten Abfälle (*Wärmeproduktion*) werden auch Auswirkungen auf das Temperatur- und Spannungsfeld im Gebirge haben (*Thermische Expansion oder Kontraktion*). Somit sind wesentliche Randbedingungen für die Ausprägung der *Auflockerungszone* geändert. Auswirkungen auf die Ausprägung der *Auflockerungszone* sind – zumindest bereichsweise – nicht auszuschließen.

Auf die Funktion der Verschlussbauwerke werden diese gebirgsmechanischen Einwirkungen keine Auswirkungen haben, da die *Auflockerungszone* vor Errichtung der Barriere soweit wie möglich entfernt wird. Darüber hinaus ist eine Abdichtung von Rissen durch Zementinjektionen möglich. Für die Verschlussbauwerke ist eine integrale Dichtigkeit nachzuweisen, die auch die *Auflockerungszone* mit einschließt. Alle anderen FEP wirken in ähnlicher Weise wie in der Variante B1 auf die *Auflockerungszone* ein.

Variante C: Die Grubenräume der Variante C sind in den Einlagerungsfeldern (300 m tiefe, vertikale Einlagerungsbohrlöcher, große Einlagerungsnischen) deutlich anders konfiguriert als in der Variante B1 /BOL 12/. Diese Grubenraumgeometrie und die andere Einbringung der wärmeentwickelnden Abfälle werden auch Auswirkungen auf das Temperatur- und Spannungsfeld im Gebirge haben. Somit ist eine bereichsweise abweichende Ausprägung der Auflockerungszone nicht auszuschließen.

In den Einlagerungsbohrlöchern ist das Gebirge bereits vor der Einlagerung auf die Bohrlochverrohrung aufgelaufen. Hierdurch baut sich hier frühzeitig ein Stützdruck auf, der zu einem raschen Verschließen der Auflockerungszone beiträgt. Da die Entwicklung der Auflockerungszone bei der Konzeptentwicklung für die Verschlussbauwerke berücksichtigt wird, wird sie keine negativen Auswirkungen auf die Funktion der Verschlussbauwerke haben. Vor der Errichtung des Verschlussbauwerks wird die Auflockerungszone jeweils soweit wie möglich entfernt und Risse – soweit erforderlich – durch Zementinjektionen abgedichtet.

Die Einwirkungen des geänderten Fluiddrucks, z. B. durch Gasbildung (abweichende Metallkorrosion), auf die Auflockerungszone sind zu prüfen. Alle anderen FEP wirken in ähnlicher Weise wie in der Variante B1 auf die Auflockerungszone ein.



**Abb. 2.17** Auswirkungen auf die Auflockerungszone

### 2.17.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.17.2 Beeinflussende FEP

#### 2.17.2.1 Inventar: Sonstige Stoffe

Das FEP beschreibt u. a. die materialspezifischen Eigenschaften des Verfüllmaterials von Erkundungsbohrungen, von denen die Ausbildung und Entwicklung der Auflockerungszone um die Bohrlöcher abhängt.

**Tab. 2.113** Beeinflussende FEP für das FEP *Inventar: Sonstige Stoffe*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Abfallmatrix	Korrosion von Glas
Brennelement-Behälter	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Sonstige Endlagerbehälter	Verhalten von grafithaltigen Materialien und Urantails
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Bohrlochverrohrung	

Von den beeinflussenden FEP sind nur die FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien* (Quellen von Verfüllmaterial bei Lösungszutritt), *Korrosion von Materialien mit Zement- und Sorelphasen* (Bohrlochverfüllung) und *Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock* (Zersetzung von PE-Rohren in Bohrungen) im Hinblick auf die Ausbildung der Auflockerungszone relevant.

Endlagervarianten B2 und C: Die für die Ausbildung der Auflockerungszone relevanten FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Endlagervariante B1.

### 2.17.2.2 Verschlussmaterial

Die Steifigkeit des Verschlussmaterials beeinflusst über den Stützdruck auf die Hohlraumkontur die Ausprägung der Auflockerungszone.

Kaltzeitliche Einwirkungen (z. B. *Glaziale Rinnenbildung*) auf die Schachtverschlüsse sind, da sie erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer auftreten, nur von untergeordneter sicherheitstechnischer Bedeutung.

Variante B1: Durch die *Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse* wird die Steifigkeit der Barrieren reduziert und durch den reduzierten Stützdruck die *Auflockerungszone* beeinflusst.

Durch die *Konvergenz*, die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* und das *Quellen des Bentonits* wird ein Druck auf die Auflockerungszone ausgeübt. Die *Thermische Expansion oder Kontraktion*, *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen*, *Auflösung und Ausfällung* sowie *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* beeinflussen die mechanischen Eigenschaften der Verschlussmaterialien und damit auch die *Auflockerungszone*.

Varianten B2 und C: Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration weichen die thermomechanischen Einflüsse (*Thermische Expansion oder Kontraktion*, *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*) von der Variante B1 ab. Diese Einflüsse werden aber durch die Materialwahl und die Barrierenauslegung abgedeckt. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.114** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

Beeinflussende FEP	Quellen des Bentonits*
Glaziale Rinnenbildung	Auflösung und Ausfällung
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Konvergenz*	Thermische Expansion und Kontraktion*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Kanalisation in Dichtelementen	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.17.2.3 Schachtverschlüsse

Die Auflockerungszone wird im Bereich der Dichtelemente der Schachtverschlüsse bis auf 30 cm entfernt. Der Stützdruck der Schachtverschlüsselemente auf die Schachtwandung wird zum rascheren Verschließen der Auflockerungszone führen.

Kaltzeitliche Einwirkungen (z. B. *Subrosion*, *Glaziale Rinnenbildung*) auf die Schachtverschlüsse sind, da sie erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer auftreten, nur von untergeordneter sicherheitstechnischer Bedeutung. Die Auflockerungszone sollte zu diesem Zeitpunkt verschlossen sein.

**Tab. 2.115** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Diapirismus	Lageverschiebung eines Schachtverschlusses
Subrosion	Kanalisation in Dichtelementen
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits*
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Durch ein *Erdbeben* oder eine *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* infolge Salzaufstieg (*Diapirismus*) kann die mechanische Stabilität des Schachtverschlusses beeinträchtigt werden. Dies hat Auswirkungen auf die Auflockerungszone.

Die mechanischen Eigenschaften der Schachtverschlüsselemente werden durch das *Verschlussmaterialien* und dessen *Quellvermögen (Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Quellen des Bentonits)* bestimmt. Durch eine *Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse* kann die mechanische Stabilität der Barrieren beeinträchtigt werden.

Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* und die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Wirtsgestein und in der Barriere sowie die *Konvergenz* führen zu einem Stützdruck an der Hohlraumkontur. Ein erhöhter *Fluiddruck* kann zu einem Wiederaufreißen der Auflockerungszone führen.

Varianten B2 und C: Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration weichen die thermomechanischen Einflüsse (*Thermische Expansion oder Kontraktion, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Konvergenz, Fluiddruck*) von der Variante B1 ab. Diese Einflüsse werden aber durch die Materialwahl und die Barrierenauslegung abgedeckt. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### 2.17.2.4 Streckenverschlüsse

Die *Auflockerungszone* wird im Bereich der Dichtelemente der Streckenverschlüsse weitgehend entfernt. Der Stützdruck der Streckenverschlüsselemente auf die Hohlraumwandung wird zum raschen Verschließen der Auflockerungszone führen.

**Tab. 2.116** Beeinflussende FEP für das FEP *Streckenverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Diapirismus	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung sind – abgesehen von den schachtspezifischen FEP (Kaltzeit-FEP, *Lageverschiebung des Schachtverschlusses, Quellen des Bentonits*) – identisch mit dem FEP *Schachtverschlüsse* (s. o.).

Varianten B2 und C: Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration weichen die thermomechanischen Einflüsse (*Thermische Expansion oder Kontraktion, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Konvergenz, Fluiddruck*) von der Variante B1 ab. Diese Einflüsse werden aber durch die Materialwahl und die Barrierenauslegung abgedeckt.

Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1. Abweichende Einwirkungen auf die Auflockerungszone ergeben sich nicht.

#### **2.17.2.5 Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen**

Die mechanischen Eigenschaften der Schacht- und Streckenverschlüsse können sich durch eine Alteration verändern und so das Verschließen und Verheilen der Auflockerungszone beeinflussen. Bei reduzierten Material-Steifigkeiten ist der Stützdruck auf die Hohlraumkontur vermindert, was sich auf die Entwicklung der Auflockerungszone auswirkt.

Variante B1: Durch eine Alteration können die mechanischen Eigenschaften des *Verschlussmaterials* und der *Schachtverschlüsse* sowie der *Streckenverschlüsse* beeinträchtigt werden. Die *Auflösung und Ausfällung* sowie die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* sind Teilaspekte der Alteration, die durch das *Geochemische Milieu im Grubenbau* bzw. bei den Schächten auch durch die *Hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge* gesteuert werden.

Im Gegensatz dazu kann ein Aufquellen von Baustoffen (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung*) die Einspannung der Barriereelemente erhöhen.

Der Stofftransport durch die Barriere erfolgt über *Diffusion*. Da für das Referenzszenarium unterstellt wird, dass sich die *Auflockerungszone* in der vorgesehenen Weise schließt, werden auch für den Stofftransport am Kontakt Barriere – Gebirge diffusive Prozesse unterstellt. Ein advektiver Stofftransport ist weniger wahrscheinlich. Diese Stofftransportprozesse können auch zur Alteration der Barrieren beitragen.

Varianten B2 und C: Die beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1. Abweichende Einwirkungen auf die *Auflockerungszone* ergeben sich nicht.

**Tab. 2.117** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Streckenverschlüsse*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Auflockerungszone
Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Advektion
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	Diffusion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.17.2.6 Sonstige Verschlussbauwerke

Für die Varianten B1 und B2 sind nur die Dichtpfropfen relevant, für die Endlagervariante C zusätzlich die Bohrlochverschlusspfropfen. Der Stützdruck der Verschlussbauwerke auf die Hohlraumwandung kann das Verschließen der Auflockerungszone beschleunigen.

Varianten B1 und B2: Die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung sind – abgesehen von den streckenverschlusspezifischen FEP – weitgehend identisch mit dem FEP *Streckenverschlüsse* (s. o.). Aufgrund der Nähe zu den Einlagerungsstrecken und die daraus resultierenden hohen Temperaturen nach der Einlagerung ergibt sich für die Dichtpfropfen auch eine Beeinflussung durch die *Thermochemische Sulfatreduktion*, was Auswirkungen auf den Stützdruck haben kann.

Variante C: Das Gebirge ist bereits vor der Beladung der Einlagerungsbohrlöcher auf die *Bohrlochverrohrung* aufgelaufen. Daher wird sich frühzeitig ein Stützdruck aufbauen, der das Verschließen und Verheilen der Auflockerungszone begünstigt. Entsprechend der anderen Endlagerkonfiguration werden die *Thermische Expansion oder Kontraktion*, die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*, die *Konvergenz* und der *Fluiddruck* anders ausgebildet sein. Es ist zu prüfen, ob durch die Volumenzunah-

me infolge der *Thermochemischen Sulfatreduktion* möglicherweise in der Auflockerungszone Risse aufreißen können. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Endlagervariante B1.

**Tab. 2.118** Beeinflussende FEP für das FEP *Sonstige Verschlussbauwerke*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Ausfall eines Dichtpfropfens
Diapirismus	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Bohrlochverrohrung*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	Thermochemische Sulfatreduktion
Thermische Expansion oder Kontraktion*	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.17.2.7 Bohrlochverrohrung

Das Gebirge wird bereits vor der Beladung der Einlagerungsbohrlöcher auf die Bohrlochverrohrung aufgelaufen sein. Daher wird sich frühzeitig ein Stützdruck aufbauen, der das Verschließen der Auflockerungszone begünstigt. Dieser Stützdruck kann reduziert sein, falls die mechanische Verrohrung ausfällt. Es ist zu prüfen, ob in diesem Fall in der Auflockerungszone wieder Risse aufreißen können.

Variante C: Im Hinblick auf die Ausprägung der *Auflockerungszone* sind die mechanischen Eigenschaften des Materials der *Bohrlochverrohrung* relevant. Die Sandverfüllung der Bohrlochverrohrung (*Versatz*) erhöht die mechanische Stabilität. Falls die Bohrlochverrohrung durch *Metallkorrosion* oder *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* ausfällt, hat dies Auswirkungen auf die Auflockerungszone. Die *Konvergenz*, der *Fluiddruck*, die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Materials sowie die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* beeinflussen die Einspannung im Gebirge.

**Tab. 2.119** Beeinflussende FEP für das FEP *Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Erdbeben	Metallkorrosion
Diapirismus	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Inventar: Metalle	Wärmeproduktion
Versatz	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Sonstige Verschlussbauwerke*	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Radiolyse
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Fluiddruck*	Hebung oder Senkung von Endlagerbehältern

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.17.2.8 Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Variante C: Das FEP beschreibt den Verlust der mechanischen Integrität durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen (*Diapirismus, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Fluiddruck, Metallkorrosion* oder *Materialversprödung*) oder unerkannte Fertigungsfehler. Ein derartiger Ausfall führt zu einer Druckentlastung an der Bohrlochkontur und beeinflusst damit die Auflockerungszone.

**Tab. 2.120** Beeinflussende FEP für das FEP *Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Metallkorrosion
Diapirismus	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Bohrlochverrohrung*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Konvergenz*	Fluiddruck*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.17.2.9 Konvergenz

Durch die Konvergenz wird mit dem Auflaufen des Gebirges auf die Verschlussbauwerke und den Salzgrusversatz ein Stützdruck an der Hohlraumkontur aufgebaut, der zum Verschließen der Auflockerungszone beiträgt.

Da in den verschiedenen Varianten die Spannungsverhältnisse im Gebirge aufgrund der anderen Endlagergeometrie abweichen, ist auch eine andere Ausprägung der Konvergenz wahrscheinlich.

**Tab. 2.121** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*

Beeinflussende FEP	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Sonstige Stoffe*	Bohrlochverrohrung*
Versatz	Ausfall einer Bohrlochverrohrung*
Verschlussmaterial*	Fluiddruck*
Schachtverschlüsse*	Salzgruskompaktion*
Streckenverschlüsse*	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Wirtsgestein*
Sonstige Verschlussbauwerke	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der Stützdruck, der auf die Hohlraumkontur ausgeübt wird, und die resultierende Konvergenzentwicklung hängen von den mechanischen Eigenschaften des lokal unterschiedlichen Versatz- und Verschlussmaterials sowie vom Design der Verschlussbauwerke oder technischer Einrichtungen (z. B. Streckenausbau) ab. Durch eine Alteration, aber auch durch eine Lageverschiebung können die mechanischen Eigenschaften der Verschlüsse beeinträchtigt werden. Der *Fluiddruck* kann der *Konvergenz* entgegenwirken. *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Wirtsgestein stehen in enger Wechselwirkung mit der *Konvergenz*.

Varianten B2: Die abweichenden relevanten Einflüsse auf die Konvergenz beschränken sich für die Variante B2 auf die anderen thermomechanischen Spannungen im Gebirge und den entsprechend anderen *Fluiddruck*.

Variante C: Durch die *Konvergenz* läuft das Gebirge bereits vor der Beladung der Einlagerungsbohrlöcher auf die *Bohrlochverrohrung* auf. Eine Beeinflussung der Konvergenz ergibt sich außerdem durch die Bohrlochverschlusspfropfen (*Sonstige Verschlussbauwerke*). Zudem werden aufgrund der abweichenden Endlagerkonfiguration die Spannungsverhältnisse im Gebirge und der Fluiddruck anders ausgeprägt sein.

#### 2.17.2.10 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Durch die Auffahrung der Hohlräume des Grubengebäudes wird der Primärspannungszustand im Salzgebirge verändert. Abhängig von der Temperatur und der Mineralogie des Salzgebirges sowie durch Spannungsüberlagerungen aus benachbarten Hohlräumen kann sich das Salz über das reine Kriechen hinaus deformieren und an der Kontur bei Überschreiten der Dilatanzgrenze durch Rissbildung eine Auflockerungszone ausbilden.

Kaltzeitliche Einwirkungen (*Inlandvereisung, Glaziale Rinnenbildung*) treten erst zu späten Zeiten auf, zu denen die *Salzgruskompaktion* im vollständig verfüllten Grubengebäude sowie das Schließen und Verheilen der *Auflockerungszone* abgeschlossen sind. Daher sind diese Einwirkungen nur von untergeordneter, sicherheitstechnischer Bedeutung.

Variante B1: *Erdbeben* können Spannungskonzentrationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten induzieren. In ähnlicher Weise können sich durch Salzaufstieg (*Diapirismus*) im Bereich von Bereich von Materialinhomogenitäten oder bei lokal unterschiedlichen Verformungsraten Spannungen im Wirtsgestein aufbauen.

Der Grundspannungszustand im Gebirge wird außerdem durch mechanische Auflast bzw. Entlastung durch die Eigenschaften des *Deck- und Nebengebirges*, durch eine Meeresüberflutung infolge einer *Transgression oder Regression* oder durch die Gletscherauflast bei einer *Inlandvereisung* und wirkt sich so auf die Konvergenz aus.

Die Erwärmung des Salinars durch die wärmeentwickelnden Abfälle führt zur *Thermischen Expansion oder* (bei anschließende Abkühlung) *Kontraktion* im Gebirge. In der Folge werden *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* im Wirtsgestein induziert.

**Tab. 2.122** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Verschlussmaterial *
Erdbeben	Schachtverschlüsse*
Sedimentation	Streckenverschlüsse*
Diapirismus	Sonstige Verschlussbauwerke
Transgression oder Regression	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Inlandvereisung in randlicher Lage	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Ausfall eines Dichtpfropfens
Glaziale Rinnenbildung	Konvergenz*
Thermische Expansion oder Kontraktion*	Fluiddruck*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Brennelement-Behälter	Salzgruskompaktion*
Sonstige Endlagerbehälter	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Versatz	Quellen des Bentonits*
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Technische Eigenschaften und deren Eigenschaften	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Im Umfeld des Grubengebäudes wird die Gebirgsspannung durch die mechanischen Eigenschaften der *Brennelementbehälter* und *Sonstigen Endlagerbehälter*, durch die Steifigkeit des Versatzes (Grad der *Salzgruskompaktion*), des *Verschlussmaterials* und der *Schachtverschlüsse*, *Streckenverschlüsse* und *Sonstigen Verschlussbauwerke* beeinflusst. Dabei kann ein Aufquellen eines Baumaterials zu einer Druckerhöhung und eine Setzung (z. B. einer Schottersäule) zu einer Druckerniedrigung führen (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*). Die *Lageverschiebung eines Schachtverschlusses* würde lokal im betrachteten Verfüllabschnitt zu Steifigkeitsänderungen und damit zu Spannungsänderungen bzw. -umlagerungen führen.

Außerdem kann ein entsprechend hoher *Fluiddruck* einen Stützdruck auf das Gebirge ausüben und damit die Spannungsverhältnisse ändern. Die Eigenschaften des *Wirts-*

*gesteins* sowie des *Deck- und Nebengebirges* beeinflussen die Spannungsänderungs- bzw. Spannungsumlagerungsprozesse.

Alle Spannungsänderungen können zu einem Wiederaufreißen von Rissen in der Auflockerungszone führen.

Varianten B2 und C: Durch die andere Endlagerkonfiguration ergeben sich Unterschiede bei der *Thermischen Expansion oder Kontraktion*. Abweichende Ausprägungen werden auch die FEP *Brennelement-Behälter, Sonstige Endlagerbehälter, Versatz* (Salzgrusmengen), *Konvergenz, Fluiddruck, Salzgruskompaktion* und *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung* haben. Die *Bohrlochverrohrung* (Variante C) baut frühzeitig einen Stützdruck an der Bohrlochkontur auf.

### 2.17.2.11 Fluiddruck

Der Fluiddruck kann das Schließen der Risse in der Auflockerungszone beeinflussen. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Fluiddruck sind einerseits die Konvergenz und andererseits die Gasbildung/Gasmenge.

**Tab. 2.123** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung*	Quellen des Bentonits*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Wärmeproduktion
Konvergenz*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der *Fluiddruck* wird durch die Lösungs- und Gasmengen im Grubengebäude bestimmt. Die Lösungen in den Einlagerungsbereichen leiten sich aus der Restfeuchte im Versatz, der Gebirgsfeuchte und mit den Abfallgebinden eingebrachten Lösungen (geringe Restfeuchtigkeit in Brennelement-Behältern, 6.772 t in vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen) ab. Im Infrastrukturbereich können aus Reservoir-

ren im Leine-Salz (z3) max. 5.100 m<sup>3</sup> Lösung sowie durch die Schachtverschlüsse geringe Lösungsmengen (einige 100 m<sup>3</sup>) zutreten.

Der Gasdruck wird zunächst durch die eingeschlossene Luft bestimmt. Später wird er durch die Gasbildung (*Mikrobielle Prozesse im Grubenbau, Metallkorrosion und Radio-lyse*) aus der Degradation von Abfallgebinden und technische Einrichtungen erhöht. Weiteres Gas kann aus den Kohlenwasserstoff-Vorkommen und der *Thermochemischen Sulfatreduktion* resultieren. Falls der Fluiddruck die minimale Hauptspannung im Gebirge überschreitet, kann es zur *Druckgetriebenen Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* kommen, wobei die Integrität des Gesteins nicht beeinträchtigt wird.

Durch Volumenänderungen infolge der *Konvergenz* der Hohlraumkontur, durch *Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien*, durch das *Quellen von Bentonit*, durch die *Wärmeproduktion* und durch die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Salzgebirges und der Baustoffe wird der Fluiddruck beeinflusst.

Varianten B2 und C: Aufgrund der abweichenden thermomechanischen Verhältnisse wird die Ausprägung der Konvergenz von Variante B1 abweichen. Bezüglich der Gasbildung und Gasmenge werden für die Variante C aufgrund der geänderten Mengen der *Lösungen im Grubenbau* (Restfeuchte in der Sandverfüllung und in den Behältern) und Intensität der Metallkorrosion (Behältermaterialien, *Bohrlochverrohrung*) Unterschiede zu Variante B1 erwartet.

#### **2.17.2.12 Salzgruskompaktion**

Der Salzgrus erzeugt mit fortschreitender Kompaktion einen zunehmenden Stützdruck auf die Hohlraumkontur und damit auf die *Auflockerungszone*. Dadurch wird das Schließen der Auflockerungszone beeinflusst.

Variante B1: Die Stabilität der *Brennelement-Behälter* und der *Sonstigen Endlagerbehälter* sowie der *Technischen Einrichtungen* (z. B. Streckenausbauten) beeinflussen die *Salzgruskompaktion*.

Die Eigenschaften des *Versatzes* (Salzgrus) bestimmen primär das Kompaktionsverhalten des Salzgruses.

Die *Konvergenz* ist der wesentliche Auslöser der Salzgruskompaktion. Der *Fluiddruck* (Porendruck) kann der *Konvergenz* und damit der *Salzgruskompaktion* entgegenwirken.

Die Plastizität des Salzes erhöht sich durch *Lösungen im Grubenbau*. Durch die Fluide und die *Konvergenz* können sich Fluiddrucke aufbauen, die der *Salzgruskompaktion* entgegenwirken. Die *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* im Gebirge beeinflussen die *Konvergenz* und damit die *Salzgruskompaktion*.

**Tab. 2.124** Beeinflussende FEP für das FEP *Salzgruskompaktion*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Konvergenz*
Brennelement-Behälter	Fluiddruck*
Sonstige Endlagerbehälter	Lösungen im Grubenbau
Versatz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Varianten B2 und C: Die aufgrund der Endlagerkonfigurationen abweichenden gebirgsmechanischen Verhältnisse werden sich auf die *Konvergenz* und damit auf die *Salzgruskompaktion* auswirken. Wie sich Unterschiede bezüglich des *Fluiddrucks* (z. B. durch abweichende *Gasbildung*) auf die Kompaktion auswirken, kann auf der Basis von reinen Plausibilitätsbetrachtungen nicht eingeschätzt werden. Die Versatzmengen sind in den Varianten entsprechend der Grubenraumgeometrie unterschiedlich.

### 2.17.2.13 Quellen des Bentonits

Im Bereich des Bentonit-Dichteelementes soll im Schacht die Auflockerungszone bis auf 30 cm entfernt werden /MÜL 12a/. Durch das *Quellen des Bentonits* bildet sich an der Schachtwandung ein zunehmender Stützdruck aus, der das Schließen der *Auflockerungszone* beschleunigt.

Variante B1: Das *Verschlussmaterial* und das Design des *Schachtverschlusses* bestimmen die Intensität und den Ablauf des Bentonitquellens. Voraussetzung sind LÖ-

sungen im Grubenbau und ein entsprechendes Geochemisches Milieu im Grubenbau. Durch eine *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* kann das Quellvermögen des Bentonits beeinträchtigt werden.

Die Konvergenz wirkt dem Bentonitquellen entgegen. Durch eine *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* können Risse aufreißen, die die Aufsättigung des Bentonits mit Lösungen beeinflussen. Solange die *Auflockerungszone* noch hydraulisch durchlässig ist, kann sie zur Aufsättigung des Bentonits beitragen. Die Einspannung in das Gebirge beeinflusst das Quellen des Bentonits.

Varianten B2 und C: Relevante Abweichungen von der Variante B1 sind die Spannungsverhältnisse im Gebirge, die *Konvergenz* und die Ausprägung der *Auflockerungszone*. Die anderen beeinflussenden FEP sind entweder für den Schacht nicht relevant oder in gleicher Weise ausgeprägt wie in der Variante B1.

**Tab. 2.125** Beeinflussende FEP für das FEP *Quellen des Bentonits*

Beeinflussende FEP	Lösungen im Grubenbau
Verschlußmaterial*	Kanalisation in Dichtelementen
Schachtverschlüsse*	Lösungszutritt ins Grubengebäude
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Konvergenz*	Auflockerungszone
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.17.2.14 Thermische Expansion oder Kontraktion

Durch die Erwärmung des Gebirges infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kommt es zur Expansion des Gebirges. Die resultierenden Spannungen beeinflussen die *Auflockerungszone*.

Temperaturänderungen durch Kaltzeiten (*Permafrost, Inlandvereisung*) sind bezüglich der Entwicklung der Auflockerungszone im Grubengebäude nicht relevant.

Variante B1: Aus der *Wärmeproduktion* durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle resultiert die Aufheizung und Expansion des Salzgebirges und der geotechnischen Barrieren. Bei Abklingen der Aufheizung kommt es zur Kontraktion.

Variante B2 und C: Durch die abweichende Konfiguration der Einlagerungsfelder ergibt sich ein anderes Temperaturfeld und eine abweichende Expansion von Gebirge und technischen Bauwerken. Wesentlich für die Darstellung der abweichenden Temperaturverhältnisse sind die FEP *Brennelement-Behälter* und *Sonstige Endlagerbehälter*. Diese FEP beschreiben die *Wärmeproduktion* der Behälter.

**Tab. 2.126** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Brennelement-Behälter
Permafrost	Versatz
Inlandvereisung in randlicher Lage	Verschlussmaterial*
Vollständige Inlandvereisung	Sonstige Verschlussbauwerke*
Wärmeproduktion	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
<b>Beeinflussende FEP</b>	Bohrlochverrohrung*
Abfallmatrix	Wirtsgestein*
Sonstige Endlagerbehälter	Deck- und Nebengebirge

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.17.2.15 Wirtsgestein

Die Zusammensetzung des Salinars (z. B. Anhydritlagen) beeinflusst das Konvergenzverhalten des Wirtsgesteins und beeinflusst so auch die *Auflockerungszone*.

Das Wirtsgestein wird durch die konzeptspezifischen Temperatur- und Spannungsverhältnisse beeinflusst.

Temperaturänderungen durch Kaltzeiten (*Permafrost*, *Inlandvereisung*) sind bezüglich der Entwicklung der Auflockerungszone im Grubengebäude nicht relevant, da die Hohlräume im Grubengebäude zu dieser Zeit alle geschlossen sind.

Variante B1: Die Wirtsgesteinseigenschaften haben wesentlichen Einfluss auf den Ablauf thermischer, mechanischer, hydraulischer und chemischer Prozesse im Endlagerbereich.

*Erdbeben* und *Salzaufstieg (Diapirismus)* verändern die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein und wirken sich so auf die *Konvergenz* und die Eigenschaften der *Auflockerungszone* aus.

Bei einem Zutritt ungesättigter oder teilgesättigter Lösungen zum Bergwerk kann es zur *Auflösung und Ausfällung* entsprechender Salzminerale kommen.

Die Wärmeproduktion der wärmeentwickelnden Abfälle führt zur *Thermischen Expansion* oder (bei der späteren Abkühlung) *Kontraktion* des umgebenden Wirtsgesteins. In der Folge kann es zu *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* kommen, die die *Auflockerungszone* beeinflussen.

**Tab. 2.127** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz*
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* sowie *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* verändern das Verformungsverhalten der Salzgesteine. Im Unterschied dazu ist der Einfluss der *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* auf die gebirgsmechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins gering /WEB 11/.

Die Volumenzunahme infolge der *Thermochemischen Sulfatreduktion* kann zum Schließen der *Auflockerungszone* beitragen.

Die Auswirkungen des *Verdampfens von Wasser*, der *Strahlungsinduzierten Aktivierung*, der *Radiolyse*, und der *Thermomigration* auf die *Konvergenz* sind nur von geringer Bedeutung.

Varianten B2 und C: Aufgrund der verschiedenen Endlagerkonfigurationen werden die FEP *Konvergenz*, *Wärmeproduktion*, *Thermische Expansion oder Kontraktion*, *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie *Thermochemische Sulfatreduktion* eine abweichende Ausprägung haben.

### **2.17.3 Nicht berücksichtigte FEP**

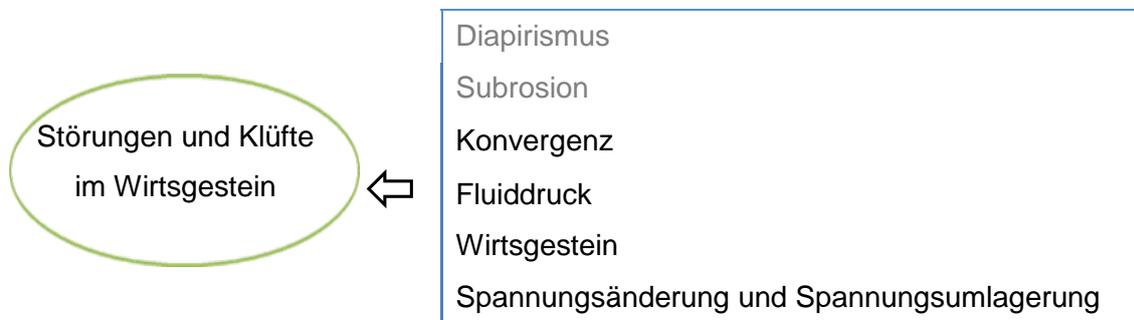
Keine.

## 2.18 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Klüfte sind makroskopisch sichtbare Trennfugen im Gestein, die keine oder nur sehr geringe Dislokationen an den Trennflächen aufweisen. Sie sind zu unterscheiden von Störungen, die durch eine deutliche Dislokation der an eine Störungszone angrenzenden Gesteine gekennzeichnet sind.

Wo offene, fluiderfüllte Klüfte vorhanden sind, ist eine zumindest partielle und zeitlich befristete Durchströmbarkeit des Wirtsgesteins möglich.

Die Ausprägung bestimmt die Anzahl von Klüften sowie deren Eigenschaften: verheilt, laugengefüllt, Reichweite, Öffnungsweite.



**Abb. 2.18** Ausprägung von Störungen und Klüften im Wirtsgestein

Die FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* und *Fluiddruck* sind bestimmend für die Ausprägung des FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Wirtsgesteins ermöglichen die Prozesse ein Entstehen neuer oder ein Aufweiten bzw. Verschließen bereits existierender Störungen und Klüfte.

Störungs- und Kluftsysteme sind in den Gesteinen der Leine-Folge oder im Übergangsbereich des z2/z3 vorhanden. Im Hauptsalz sind bislang nur Klüfte festgestellt worden, die geschlossen oder durch Sekundärminerale verheilt waren /WEB 13/.

Aufgrund der Erkundungsergebnisse wird unterstellt, dass in den für die Einlagerung vorgesehenen Gesteinen des Hauptsalzes keine größeren Störungs- und Kluftvorkommen vorliegen, die permeabel sind und Migrationswege für Fluide darstellen.

### 2.18.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.18.2 Beeinflussende FEP

#### 2.18.2.1 Fluiddruck

Ein variierender Fluiddruck kann zu einer Klüfterweiterung oder zu einem Klüftverschluss beitragen.

**Tab. 2.128** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*

Beeinflussende FEP	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung	Quellen des Bentonits
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Wärmeproduktion
Konvergenz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

*Strömungsvorgänge im Grubengebäude* können den Fluiddruck durch Druckausgleich lokal verringern.

*Gasmenge im Grubenbau*: Die sich bildende Gasmenge im Grubenbau erhöht den Fluiddruck und kann die hydrostatischen Drücke in der Flüssigkeit beeinflussen.

*Konvergenz* kann durch eine Verringerung von Hohlräumen zu einer Druckzunahme führen.

*Thermische Expansion oder Kontraktion* führt zu einer Druckzu-/abnahme bei Erwärmung / Abkühlung des Fluids.

### 2.18.2.2 Wirtsgestein

Die Ausbildung von Störungen und Klüften im Wirtsgestein hängt von den petrologischen und strukturellen Eigenschaften des Wirtsgesteins ab.

**Tab. 2.129** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz*
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Auflockerungszone*: Sie stellt eine physikalische Schwächung des Wirtsgesteins dar, die lokal die Bildung von Klüften begünstigen kann.

*Fluidvorkommen im Wirtsgestein, Wärmeproduktion*: Beide FEP führen zu einer erhöhten Fließfähigkeit von Salzgestein was eine Bildung von Klüften erschwert.

### 2.18.2.3 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen können zu einer Klufferweiterung oder zu einem Kluftverschluss beitragen.

*Thermische Expansion oder Kontraktion*: Die Erwärmung durch HAW führt zu Spannungen im Wirtsgestein.

*Deck- und Nebengebirge*: Unterschiedliche Materialeigenschaften an der Grenze des Salzstocks können zu Spannungsbildung führen.

*Salzgruskompaktion* führt zu einer Entspannung des Gebirges, sofern sie schneller vor sich geht als die Konvergenz.

*Quellen des Bentonits*: Wenn der Quelldruck des Bentonits anders ist als der Gebirgsdruck, führt er zu Spannungen. Ist er kleiner als der Gebirgsdruck stellt er eine Spannungsentlastung dar. Ist er größer als der Gebirgsdruck stützt er das Gebirge. Ist er viel größer kann er zu Rissbildungen führen.

**Tab. 2.130** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen*

<b>Auslösende FEP</b>	Quellen des Bentonits
Inlandvereisung in randlicher Lage	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Salzgruskompaktion
Thermische Expansion oder Kontraktion	Fluiddruck*
Transgression oder Regression	Konvergenz*
Diapirismus	Streckenverschlüsse
Sedimentation	Schachtverschlüsse
Erdbeben	Verschlussmaterial
Glaziale Rinnenbildung	Sonstige Verschlussbauwerke
<b>Beeinflussende FEP</b>	Versatz
Wirtsgestein*	Sonstige Endlagerbehälter
Deck- und Nebengebirge	Brennelement-Behälter
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Thermochemische Sulfatreduktion
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Bohrlochverrohrung
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Ausfall eines Dichtpfropfens

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.18.2.4 Konvergenz

Konvergenz als Prozess der Hohlraumverringerung führt zur Verheilung von Klüften und wirkt einer evtl. Neubildung entgegen.

**Tab. 2.131** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Sonstige Stoffe	Bohrlochverrohrung
Versatz	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlußmaterial	Fluiddruck
Schachtverschlüsse	Salzgruskompaktion
Streckenverschlüsse	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Wirtsgestein
Sonstige Verschlussbauwerke	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.18.3 Nicht berücksichtigte FEP

*Diapirismus*: Wegen der zukünftigen geringen Aufwärtsbewegungen der Salzgesteine ist mit keinen bedeutsamen Änderungen der momentanen Verteilung und Eigenschaften der Störungen und Klüfte im Wirtsgestein zu rechnen.

*Subrosion*: Am Salzspiegel vorhandene Klüfte können durch die Subrosion erweitert werden, sofern die Klüfte mit gering mineralisiertem Wasser durchströmt werden. Da nur Klüfte im Salzspiegelbereich betroffen sein können, hat das beeinflussende FEP für die übrigen Störungs- und Klüftvorkommen keine Bedeutung.

## 2.19 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Der teufenabhängige Gebirgsdruck und die Geologie bestimmen den Primärspannungszustand des Gebirges. Bei der Auffahrung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks werden Sekundärspannungen an der Hohlraumkontur auftreten, die zur Ausbildung einer Auflockerungszone durch dilatante Verformungen und an der Kontur zu konvergenzbedingten Verformungen führen kann. Durch die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges wird es zur thermischen Expansion bzw. bei der späteren Abkühlung zur Kontraktion des Gebirges kommen. Dabei werden Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge auftreten. Weiterhin sind während der Nachverschlussphase mögliche Beanspruchungen des Gebirges und der geotechnischen Bauwerke durch den Fluiddruck zu berücksichtigen. Spannungsänderungen im Salzgebirge werden sich in Zukunft auch durch geänderte Auflasten (Gletscherüberfahrung, Sedimentation, Erosion) ergeben.

Das FEP zeigt direkte Einwirkungen auf die Funktion der Initial-Barrieren „Wirtsgestein“, „Streckenverschlüsse“, „Schachtverschlüsse“ und „Brennelement-Behälter“.

Der Ausprägung des FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* in Baumaterialien und im Wirtsgestein ist durch Modellrechnungen zu ermitteln. Im Folgenden werden daher nur die relevanten Einflüsse qualitativ dargestellt.

Variante B1: Wichtige Randbedingungen für die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Wirtsgestein sind die Einlagerungsgeometrie sowie die Eigenschaften von Behältern, Versatz- und Verschlussmaterial und des Wirtsgesteins. Die Behälterereigenschaften und die Einlagerungsgeometrie bestimmen die abfallinduzierten thermischen Einwirkungen auf das Wirtsgestein. Da die Auslegung der dickwandigen POLLUX- und CASTOR-Behälter auch die Stabilität gegen den Gebirgsdruck abdeckt, werden diese Behälter gemeinsam mit dem *Versatz* zum Aufbau eines Stützdrucks in den Strecken beitragen.

Die Ausbildung eines Stützdrucks in den Grubenräumen wird von den Eigenschaften der Versatz- und Verschlussmaterialien bestimmt. Der nicht kompaktierbare *Versatz* (Basalt, Serpentin) im Infrastrukturbereich und in den Schächten wird vergleichsweise rasch einen Stützdruck aufbauen. Der im restlichen Grubengebäude eingebrachte Salzgrusversatz wird durch die spannungsinduzierte Konvergenz kompaktiert und bil-

det erst mit zunehmender Steifigkeit einen Stützdruck aus. Die *Salzgruskompaktion* wird wenige 1000 Jahre andauern. Dabei wird die Kompaktion des angefeuchteten Salzgrus rascher fortschreiten als die Kompaktion des vergleichsweise trockenen Salzgrus.

Für den Stützdruck durch die *Streckenverschlüsse*, *Schachtverschlüsse* sowie die *Sonstigen Verschlussbauwerke* (Dichtpfropfen) und die *Technischen Einrichtungen* (Streckenausbau) ist die Druckfestigkeit des Baumaterials entscheidend. Bei Volumenänderungen von Barrierenbaumaterialien (Beton, Bentonit) führt ein Aufquellen zu einer Druckerhöhung und eine Setzung (z. B. einer Schottersäule im Schacht) zu einer Druckerniedrigung im angrenzenden Gebirge. Daher wird das Quellvermögen der Materialien durch die Verwendung entsprechender Rezepturen so eingestellt, dass einerseits die Einspannung des Dichtelementes gewährleistet ist, andererseits der Quelldruck die Integrität des Wirtsgesteins aber nicht beeinträchtigt.

Die *Lageverschiebung eines Schachtverschlusses* würde lokal im betrachteten Verfüllabschnitt zu Steifigkeitsänderungen und *damit zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* führen. In ähnlicher Weise würde der *Ausfall eines Dichtpfropfens* die Spannungsverhältnisse lokal ändern. Die Mineralogie sowie Struktur und Textur im *Wirtsgestein* sind wichtig für die Spannungsverteilung im Salzgebirge.

Weiterhin sind während der Nachverschlussphase mögliche Beanspruchungen des Gebirges und der geotechnischen Bauwerke durch den *Fluiddruck* zu berücksichtigen. Der Lösungsanteil des Fluiddrucks leitet sich aus der Restfeuchte im Versatz, der Gebirgsfeuchte, mit den Abfallgebinden eingebrachte Lösungen (vor allem vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle) sowie im Infrastrukturbereich aus Lösungszutritten aus Reservoirs im Leine-Salz sowie durch die Schachtverschlüsse ab. Der Gasdruck wird zunächst durch die eingeschlossene Luft bestimmt. Später wird er durch die Gasbildung (*Mikrobielle Prozesse*, *Metallkorrosion* und *Radiolyse*) aus der Degradation von Abfallgebinden sowie durch Gas aus *Kohlenwasserstoffvorkommen* und der *Thermochemischen Sulfatreduktion* erhöht. Bei Überschreiten der minimalen Hauptspannung des Gebirges kann es zur *Druckgetriebenen Infiltration von Fluiden in das Wirtsgestein* kommen.

Durch die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges wird es zur thermischen Expansion bzw. bei der spä-

teren Abkühlung zur Kontraktion des Gebirges kommen. Dabei werden Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge auftreten.

Wenn es durch zukünftige Klimaentwicklungen zu einer tiefreichenden Abkühlung der Gesteine (*Permafrost*) kommt, kann es im *Deck- und Nebengebirge* und in den oberen Bereichen des *Wirtsgesteins* zu Kontraktionen kommen (*Kryogene Klüfte*).

Die Volumenzunahme durch Bildung neuer Mineralphasen infolge der *Thermochemischen Sulfatreduktion* kann ebenfalls die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflussen.

Weitere zukünftige Auswirkungen auf den Grundspannungszustand des Gebirges werden sich aus mechanischen Auflasten bzw. Entlastungen durch die Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges, durch eine Erhöhung der Schichtmächtigkeiten durch Sedimentation (z. B. während einer Kaltzeit oder während einer Transgression), durch eine Meeresüberflutung infolge einer Transgression (bei einer Warmzeit) oder Regression (bei einer Abkühlung), durch die Gletscherauflast bei einer *Inlandvereisung* oder durch eine Reduzierung der Deckgebirgsmächtigkeit durch Erosion infolge *Glazialer Rinnenbildung* oder durch *Subrosion* ergeben.

Zudem können *Erdbeben* Spannungskonzentrationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten induzieren. In ähnlicher Weise können sich durch Salzaufstieg (*Diapirismus*) im Bereich von Materialinhomogenitäten oder bei lokal unterschiedlichen Verformungsraten Spannungen im Wirtsgestein aufbauen.

Variante B2: Aufgrund der abweichenden Geometrie der Einlagerungsbereiche der Variante B2 wird sich eine andere Spannungsverteilung im Gebirge einstellen. Außerdem wird die andere Verteilung der Wärmequellen (Endlagerbehälter) zu einem abweichenden Temperaturfeld und resultierenden thermomechanischen Spannungen führen.

Aufgrund der unterschiedlichen Grubengebäudegeometrie werden unterschiedliche Salzgrusmengen in Richtstrecken (feuchter Salzgrus) und Querschläge (trockener Salzgrus). Hieraus ergeben sich kumulativ auch unterschiedliche Lösungsmengen im Grubenbau. Die abweichende Spannungsverteilung im Umfeld des Endlagers kann auch Auswirkungen auf die Salzgruskompaktion haben.

Im Nahfeld wird sich das abweichende Temperaturfeld auf *Thermomigration* und *Thermochemische Sulfatreduktion* auswirken. Letztere wird auch die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflussen. Die weiteren beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante C: Aufgrund der abweichenden Geometrie der Einlagerungsbereiche der Variante C wird sich eine andere Spannungs- und Temperaturverteilung im Gebirge einstellen. Die resultierenden Spannungen werden als Lasten bei der Auslegung der Verschlussbauwerke berücksichtigt werden.

In der Variante C werden die Endlagerbehälter nicht gegen die Gebirgsspannungen ausgelegt, sondern die nach den BMU-Kriterien erforderliche mechanische Integrität der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren wird durch die *Bohrlochverrohrung* gewährleistet. Das Gebirge läuft bereits vor der Einlagerung auf die Bohrlochverrohrung auf. Die Auslegung der Behälter gewährleistet die Stapelbarkeit in den 300 m tiefen Bohrlöchern.

Aufgrund der unterschiedlichen Grubengebäudegeometrie werden andere Salzgrusmengen in Richtstrecken (feuchter Salzgrus) und Querschläge (trockener Salzgrus) eingebracht als in der Variante B1. Hieraus ergeben sich kumulativ auch unterschiedliche Lösungsmengen im Grubenbau. Außerdem ist die Restfeuchte in der Sandverfüllung der Bohrlöcher zu berücksichtigen. Die abweichende Spannungsverteilung im Umfeld des Endlagers kann – über die *Konvergenz* – auch Auswirkungen auf die *Salzgruskompaktion* haben.

Im Nahfeld kann das abweichende Temperaturfeld auch Auswirkungen auf die Thermomigration und die thermochemische Sulfatreduktion haben. Letztere wirkt sich – aufgrund der Volumenzunahme der Reaktionsprodukte – auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus. Die weiteren beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

Variante A: Die Spannungsverhältnisse werden hier durch den Gebirgsspannungszustand und den *Fluiddruck* bestimmt. Thermische Einflüsse spielen keine Rolle. Da das Salzkriechen temperaturabhängig ist, werden die *Konvergenz* und dadurch bedingt die *Salzgruskompaktion* sowie das Schließen der *Auflockerungszone* langsamer ablaufen als in den Varianten des Ostflügels. Da die Endlagerbehälter für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle keine entsprechende Auslegung haben, ist davon auszu-

gehen, dass sie frühzeitig durch den Gebirgsdruck zerstört werden. Abgesehen von den FEP, die thermisch beeinflusst werden, entsprechen die weiteren beeinflussenden FEP in ihrer Ausprägung der Variante B1.



**Abb. 2.19** Einflussfaktoren auf Spannungsänderungen und -umlagerungen

## 2.19.1 Auslösende FEP

### 2.19.1.1 Erdbeben

Erdbeben können Spannungskonzentrationen insbesondere im Bereich von Materialkontrasten induzieren.

### 2.19.1.2 Sedimentation

Die Sedimentation bestimmt die Mächtigkeit des überlagernden Gebirges und somit den Grundspannungszustand im Wirtsgestein.

Das FEP ist seiner Ausprägung von den verschiedenen (Endlager-) Varianten unabhängig.

**Tab. 2.132** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Sedimentation*

<b>Auslösende FEP</b>	Topografie
Erosion	Vollständige Inlandvereisung*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Glaziale Rinnenbildung*
Transgression oder Regression*	Auflösung und Ausfällung
Inlandvereisung in randlicher Lage*	Oberflächengewässer

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

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

Die identifizierten FEP beeinflussen das FEP *Sedimentation* durch die Bereitstellung von Mechanismen für den Materialtransport, welche zur Bildung neuer Ablagerungen führen.

Die *Topografie* der Erdoberfläche steuert das Ausmaß der Erosion und bestimmt den Ort der Ablagerungen.

### 2.19.1.3 Diapirismus

Während des Salzaufstiegs (Diapirismus) werden sich im Bereich von Materialinhomogenitäten oder bei lokal unterschiedlichen Verformungsraten Spannungen aufbauen. Das FEP ist seiner Ausprägung von den verschiedenen (Endlager-) Varianten unabhängig.

**Tab. 2.133** Beeinflussende FEP für das FEP *Diapirismus*

Beeinflussende FEP	
Inlandvereisung in randlicher Lage*	Wirtsgestein*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Eine randliche Bedeckung des Standortes durch mächtiges Inlandeis kann durch seine Auflast den Salzaufstieg beeinflussen. Die verschiedenen Salzgesteine sind unterschiedlich fließfähig und beeinflussen den Aufstieg des Salzkörpers.

### 2.19.1.4 Transgression oder Regression

Der Grundspannungszustand im Wirtsgestein wird von Transgression bzw. Regression über eine mechanische Auflast oder Entlastung beeinflusst. Das FEP ist seiner Ausprägung von den verschiedenen (Endlager-) Varianten unabhängig.

**Tab. 2.134** Beeinflussende FEP für das FEP *Transgression oder Regression*

Beeinflussende FEP	
Globale klimatische Veränderungen	Topografie

Die Ausbreitung bzw. der Rückzug des Meeres wird durch klimatische Einflüsse sowie die Topografie beeinflusst. Eine Meeresüberdeckung von 50 m (aufgrund von anthropogen bedingten Klimaänderungen) wird bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt.

### 2.19.1.5 Inlandvereisung in randlicher Lage

Inlandvereisungen bedingen Veränderungen der Auflast an der Erdoberfläche, die sich auf den Grundspannungszustand des Salzgebirges auswirken.

Das FEP ist seiner Ausprägung von den verschiedenen (Endlager-) Varianten unabhängig.

**Tab. 2.135** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Inlandvereisung in randlicher Lage*

Auslösende FEP	Beeinflussende FEP
Globale klimatische Veränderungen	Topographie
	Oberflächengewässer

Kaltzeiten werden durch *Globale klimatische Veränderungen* ausgelöst. Beeinflussungen des nicht durch Inlandeis bedeckten Teils durch *Oberflächengewässer* sind im Hinblick auf die Spannungsentwicklung im Wirtsgestein von untergeordneter Bedeutung.

#### 2.19.1.6 Vollständige Inlandvereisung

Inlandvereisungen bedingen Veränderungen der Auflast an der Erdoberfläche, die sich auf den Grundspannungszustand des Salzgebirges auswirken.

Das FEP ist seiner Ausprägung von den verschiedenen (Endlager-) Varianten unabhängig.

Kaltzeiten werden durch *Globale klimatische Veränderungen* ausgelöst. Die Fließrichtung des Inlandeises wird durch die *Topografie* beeinflusst. Bei vollständiger Inlandvereisung sind *Oberflächengewässer* für Entwicklung der Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein indirekt über die *Glaziale Rinnenbildung* von Bedeutung (s. u.).

**Tab. 2.136** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Vollständige Inlandvereisung*

Auslösende FEP	Beeinflussende FEP
Globale klimatische Veränderungen	Topographie
	Oberflächengewässer

### 2.19.1.7 Glaziale Rinnenbildung

Die glazialen Rinnenbildungen unterhalb von Inlandgletschern führen zur intensiven Erosion des Deckgebirges. Hieraus resultiert eine Änderung der Auflast, die sich auf den Grundspannungszustand des Wirtsgesteins auswirkt.

Das FEP ist seiner Ausprägung von den verschiedenen (Endlager-) Varianten unabhängig.

**Tab. 2.137** Beeinflussende FEP für das FEP *Glaziale Rinnenbildung*

Beeinflussende FEP	
Erosion	Deck- und Nebengebirge*
Vollständige Inlandvereisung*	Wirtsgestein*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Unterhalb eines mächtigen Inlandeisschildes kann es durch glaziale Rinnen zu einer tiefreichenden Erosion des Untergrundes kommen. Das Ausmaß der Erosion wird durch die Eigenschaften der anstehenden Gesteine (Wirtsgestein, Deck- und Nebengebirge) beeinflusst.

### 2.19.1.8 Thermische Expansion oder Kontraktion

Dies ist das einzige auslösende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*, dessen Ausprägung in den verschiedenen Varianten aufgrund der unterschiedlichen Geometrie der Einlagerungsbereiche abweicht.

**Tab. 2.138** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Brennelement-Behälter*
Permafrost	Versatz*
Inlandvereisung in randlicher Lage*	Verschlussmaterial*
Vollständige Inlandvereisung*	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften*
Wärmeproduktion	Bohrlochverrohrung*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Wirtsgestein*
Abfallmatrix	Deck- und Nebengebirge*
Sonstige Endlagerbehälter*	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Durch Klimaentwicklungen bedingte tiefreichende Temperaturänderungen des Gebirges (*Permafrost, vollständige Inlandvereisung*) können zu Kontraktionen oder, bei anschließender Erwärmung (Warmzeiten), zur Expansion im Deckgebirge, den obersten Bereichen des Wirtsgesteins sowie in den oberen Teilen der Schachtverschlüsse führen. Diese Prozesse wirken sich auch auf die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein aus.

Aus der *Wärmeproduktion* durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle resultiert die Aufheizung und Expansion des Salzgebirges und der geotechnischen Barrieren. Bei Abklingen der Aufheizung kommt es zur Kontraktion. Diese Prozesse beeinflussen die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein.

Die materialspezifischen Eigenschaften der verschiedenen Materialien im Endlagersystem bestimmen deren *Thermische Expansion oder Kontraktion*. Für die Spannungsverhältnisse im Gebirge sind die Eigenschaften von *Brennelement-Behältern, Sonstigen Endlagerbehältern, Versatz, Verschlussmaterialien* und das *Wirtsgestein* relevant.

Variante B2: Die Ausprägung der FEP *Brennelement-Behälter* (deutliche höhere Beladung mit Brennelementen), *Sonstige Endlagerbehälter* (deutliche höhere Beladung mit CSD-V) und *Wärmeproduktion* (räumliche Anordnung der Wärmequellen) weichen von der Variante B1 ab. Die Ausprägung der anderen FEP entspricht der Variante B1.

Variante C: Die Ausprägung der FEP *Brennelement-Behälter*, *Sonstige Endlagerbehälter* und *Wärmeproduktion* (räumliche Anordnung der Wärmequellen) weichen von der Variante B1 ab. Außerdem ist die *Thermische Expansion und Kontraktion* der *Bohrlochverrohrung* und der Sandverfüllung zu berücksichtigen. Die Ausprägung der anderen FEP entspricht der Variante B1.

## 2.19.2 Beeinflussende FEP

### 2.19.2.1 Brennelement-Behälter

Im Nahfeld der Einlagerungsbereiche werden die Spannungsverhältnisse im Gebirge und im Versatz durch die mechanische Stabilität der Endlagerbehälter beeinflusst. Entsprechend ihrer Auslegung werden die dickwandigen POLLUX- und CASTOR-Behälter (falls ihre Stabilität nicht durch Korrosion beeinträchtigt ist) dem Gebirgsdruck standhalten. Jede (Endlager-) Variante wird durch andere Endlagerbehälter charakterisiert.

Variante B1: Der Behälter wirkt durch den Stützdruck auf die *Salzgruskompaktion* und die *Konvergenz*. Die Behältereigenschaften leiten sich aus dem Behältermaterial ab (*Inventar: Metalle*). Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* der Behältermaterialien wird bei der Auslegung berücksichtigt. Falls es zum Behälterversagen gekommen ist, so ist der Stützdruck, den der Behälter auf Versatz und Gebirge ausübt, reduziert. Ursachen für ein Behälterversagen könnten die *Metallkorrosion* oder eventuell eine *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* sein. Die *Zersetzung von Organika* (Moderatormaterial) und die *Radiolyse* sind von geringer Bedeutung.

Die *Thermische Expansion und Kontraktion* der Behältermaterialien wirkt sich auf die mechanischen Eigenschaften der Behälter aus, ist aber bei der Auslegung berücksichtigt worden.

**Tab. 2.139** Beeinflussende FEP für das FEP *Brennelement-Behälter*

Beeinflussende FEP	
Zersetzung von Organika	Thermische Expansion und Kontraktion*
Salzgruskompaktion*	Radiolyse
Metallkorrosion	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Versagen eines Brennelement-Behälters
Inventar: Metalle	Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B2: Die Transport- und Lagerbehälter sind gegen die *Thermische Expansion oder Kontraktion* der Behältermaterialien und gegen Gebirgsspannungen ausgelegt. Ein Versagen ist nur zu unterstellen, wenn die mechanische Stabilität der Behälter durch *Metallkorrosion* oder *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* reduziert ist. Die Ausprägung der anderen FEP entspricht der Variante B1.

Variante C: Die mechanische Integrität der Bohrlochkokillen wird durch die Bohrlochverrohrung gewährleistet. Für die Wechselwirkungen zwischen der Bohrlochverrohrung und den Spannungsverhältnissen im Gebirge sind neben dem Material der Bohrlochverrohrung alle Einflüsse wichtig, die sich auf die mechanische Stabilität der Bohrlochverrohrung auswirken (*Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme, Versagen eines Brennelement-Behälters*). Ein *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* kann dazu führen, dass der Gebirgsdruck auf die *Brennelement-Behälter* einwirkt und deren Integrität beeinträchtigt. Die Ausprägung der anderen FEP entspricht der Variante B1.

### 2.19.2.2 Sonstige Endlagerbehälter

Im Nahfeld der Einlagerungsbereiche werden die Spannungsverhältnisse im Gebirge und im Versatz durch die mechanische Stabilität der Endlagerbehälter beeinflusst. Während die Endlagerbehälter für Wiederaufarbeitungsabfälle entsprechend dem Gebirgsdruck ausgelegt werden, weisen die Endlagerbehälter für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle keine entsprechende Auslegung auf. Jede (Endlager-) Variante wird durch andere Endlagerbehälter charakterisiert.

Variante B1: Die Gebirgsspannung wirkt über die *Konvergenz* und die *Salzgrus-kompaktion* auf den Behälter. Die Behältereigenschaften leiten sich aus dem Behältermaterial ab (Inventar-FEP). Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* wird bei der Auslegung berücksichtigt. Falls es zum mechanischen Behälterausfall gekommen ist, so ist möglicherweise der Stützdruck, den der Behälter auf Versatz und Gebirge ausübt, reduziert. Ursachen für einen Behälterausfall könnten die *Metallkorrosion* oder eventuell eine *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* sein. Die *Thermische Expansion und Kontraktion* der Behältermaterialien wirkt sich auf die mechanischen Eigenschaften der Behälter aus, ist aber bei der Auslegung berücksichtigt worden. Die *Zersetzung von Organika* (Moderatormaterial) und die *Radiolyse* sind von geringer Bedeutung.

Variante B2: Die Transport- und Lagerbehälter sind gegen die *Thermische Expansion oder Kontraktion* der Behältermaterialien und gegen Gebirgsspannungen ausgelegt. Ein Ausfall ist nur zu unterstellen, wenn die mechanische Stabilität der Behälter durch *Metallkorrosion* oder *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* reduziert ist. Die Ausprägung der anderen FEP entspricht der Variante B1.

Variante C: Die mechanische Integrität der Bohrlochkokillen wird durch die Bohrlochverrohrung gewährleistet. Für die Wechselwirkungen zwischen der Bohrlochverrohrung und den Spannungsverhältnissen im Gebirge sind neben dem Material der Bohrlochverrohrung alle Einflüsse wichtig, die sich auf die mechanische Stabilität der Bohrlochverrohrung auswirken (*Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme, Ausfall einer Bohrlochverrohrung*). Ein *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* kann dazu führen, dass der Gebirgsdruck auf die *Sonstigen Endlagerbehälter* einwirkt und deren Integrität beeinträchtigt. Die Ausprägung der anderen FEP entspricht der Variante B1.

Variante A: Die sonstigen Endlagerbehälter für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle sind nicht entsprechend dem Gebirgsdruck ausgelegt. Daher ist zu unterstellen, dass diese Behälter nach kurzer Zeit durch den Gebirgsdruck zerstört werden. Bei den Betonbehältern kann die mechanische Stabilität zudem durch eine *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* beeinträchtigt werden.

**Tab. 2.140** Beeinflussende FEP für das FEP *Sonstige Endlagerbehälter*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Inventar: Metalle	Thermische Expansion und Kontraktion*
Inventar: Sonstige Stoffe*	Radiolyse
Salzgruskompaktion*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Metallkorrosion	Ausfall eines Sonstigen Endlagerbehälters
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Ausfall einer Bohrlochverrohrung*
Zersetzung von Organika	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.19.2.3 Versatz

Die Ausbildung des Sekundärspannungszustandes im Gebirge hängt von den mechanischen Eigenschaften der eingebrachten Versatzmaterialien und dem resultierenden Stützdruck ab. Während der nicht kompaktierbare Versatz (Basalt, Serpentin) im Infrastrukturbereich und in den Schächten rasch einen Stützdruck bis zum Spannungsausgleich aufbaut, kann die Salzgruskompaktion im übrigen Grubengebäude mehrere 1000 Jahre andauern.

Der in die Grubenräume eingebrachte Versatz baut im Zuge der Kompaktion einen Stützdruck auf, der dem Gebirgsdruck entgegen wirkt. Die unterschiedlichen thermischen Verhältnisse in den (Endlager-) Varianten wirken sich auch auf den Versatz aus.

**Tab. 2.141** Beeinflussende FEP für das FEP *Versatz*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzgebirge
Konvergenz*	Wärmeproduktion
Salzgruskompaktion*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Verdampfen von Wasser
Lösungen im Grubenbau	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Kanalisation im Salzgrus	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Thermochemische Sulfatreduktion*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der *Versatz* wird durch die Konvergenz der Hohlraumkontur kompaktiert. Durch die Kompaktion des Salzgrus-*Versatzes* nimmt dessen Festigkeit zu, während die Porosität und die Permeabilität abnehmen. Dadurch erzeugt der Salzgrus einen zunehmenden Stützdruck auf die Hohlraumkontur. Durch die Restfeuchte im Salzgrus werden *Lösungen im Grubenbau* eingebracht. Die Salzgruskompaktion wird durch *Lösungen im Grubenbau* beschleunigt.

In den mit Schotter verfüllten Bereichen des Grubengebäudes wird es in der frühen Nachverschlussphase zu *Setzungen (Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien)* kommen. Dadurch baut sich rasch ein Stützdruck auf, der der Konvergenz entgegen wirkt.

Vorübergehende inhomogene Verdichtungen sind bei der Salzgruskompaktion nicht auszuschließen. Daher kann es zur Ausbildung von Fließwegen mit höheren hydraulischen Leitfähigkeiten und geringer *Versatzsteifigkeit (Kanalisation im Salzgrus)* kommen.

Im Fall eines Zutritts von teilgesättigten *Lösungen*, z. B. über die Schächte, kann es zu *Auflösung und Ausfällung* im *Versatz* kommen. Daher werden die mechanischen Eigenschaften des *Versatzes* beeinflusst. Die mikrobielle Sulfatreduktion betrifft den Anhydritanteil im Salzgrus (*Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzgebirge*).

Bei höherer Temperatur steigt die Kriechfähigkeit des Salzes. Außerdem kommt es zur *Thermischen Expansion oder Kontraktion*. Dadurch wird der Stützdruck des Versatzes auf die Kontur beeinflusst.

Im Nahfeld der Einlagerungsbereiche kann es durch die hohen Temperaturen, den Anhydritanteil und die Kohlenwasserstoffe im Salz sowie die Gebirgs- und Versatzfeuchte zu einer *Thermochemischen Sulfatreduktion* kommen. Da die Reaktionsprodukte ein um 10 % größeres Volumen als die Ausgangsprodukte haben, können Spannungen im Gebirge entstehen.

Varianten B2 und C: Alle direkt oder indirekt thermisch oder durch das Grubengebäude beeinflussten FEP (*Konvergenz, Salzgruskompaktion, Wärmeproduktion sowie Thermische Expansion oder Kontraktion, Thermochemische Sulfatreduktion, Lösungen im Grubenbau* (feuchter Salzgrus)), werden anders ausgeprägt sein als in der Variante B1. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### 2.19.2.4 Verschlussmaterial

Die Steifigkeit des Verschlussmaterials bewirkt einen Stützdruck auf die Hohlraumkontur und beeinflusst so Spannungsverhältnisse im Gebirge.

Die Verschlussmaterialien sind in allen Varianten identisch. Durch die verschiedenen thermischen und mechanischen Einwirkungen werden aber die Eigenschaften unterschiedlich beeinflusst.

**Tab. 2.142** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Glaziale Rinnenbildung*	Auflösung und Ausfällung
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Konvergenz*	Thermische Expansion und Kontraktion*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Kanalisation in Dichtelementen	Quellen des Bentonits*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Durch die *Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse* wird die mechanische Stabilität der Bauwerke reduziert und durch den verringerten Stützdruck die Spannungen im Gebirge beeinflusst. Der Stützdruck auf die Hohlraumkontur wird außerdem durch die *Konvergenz*, die *Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* und das *Quellen des Bentonits* beeinflusst.

Die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie Spannungen im Verschlussbauwerk beeinflussen die Eigenschaften der Verschlussmaterialien. Die mechanischen Eigenschaften können durch *Auflösung und Ausfällung* sowie die *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* verändert werden.

Es kann unterstellt werden, dass kaltzeitliche Einflüsse (*Glaziale Rinnenbildung*) auf die oberen Teile der Schachtverschlüsse erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse auftreten.

Varianten B1 und C: *Konvergenz, Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* werden anders ausgeprägt sein als in der Variante B1. Auch chemische Prozesse (*Auflösung und Ausfällung*, Korrosion) werden durch die Temperatur beeinflusst. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### **2.19.2.5 Schachtverschlüsse**

Die Schacht- und Streckenverschlüsse üben lokal einen Stützdruck auf die Hohlraumkontur aus und wirken sich so auf die Spannungsverhältnisse im Salzgebirge aus.

Die Verschlüsse sind in allen Varianten identisch. Durch die verschiedenen thermischen und mechanischen Einwirkungen werden aber die Eigenschaften der Verschlussmaterialien unterschiedlich beeinflusst.

Variante B1: Die Schacht- und Streckenverschlüsse sind gemäß dem (Sicherheits-) *Erdbeben* und den während der Funktionsdauer zu erwartenden Salzhebungsbeiträge (*Diapirismus*) ausgelegt.

Nach der vorgesehenen Funktionsdauer können die Schachtverschlüsse durch kaltzeitliche Einwirkungen (*Glaziale Rinnenbildungen*) in ihrer Funktion beeinträchtigt werden.

Die mechanischen Eigenschaften der Verschlüsse werden durch das *Verschlussmaterial* und die mögliche *Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen* beeinflusst.

Die *Spannungsveränderung und Spannungsumlagerung* im Wirtsgestein, die durch die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges infolge der wärmeentwickelnden Abfälle sowie (im obersten Teil der Schächte) durch klimatische Einflüsse beeinflusst wird, wirkt sich durch die *Konvergenz* auf die Verschlüsse aus. Aus dem *Fluiddruck* kann sich ebenfalls ein Stützdruck ergeben, der auf die Hohlraumkontur wirkt. Die mechanischen und hydraulischen Lasten sowie die Volumenänderungen von Baumaterialien werden bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt.

Infolge der *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* durch Salzaufstieg (Diapirismus) wird die Einspannung des Verschlusses im Gebirge reduziert. Da es sich aber während der vorgesehenen Funktionsdauer um geringe Verschiebungsbeträge handelt, wird die Funktion der Verschlüsse dadurch nicht beeinträchtigt.

**Tab. 2.143** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben*	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Diapirismus*	Lageverschiebung eines Schachtverschlusses*
Subrosion	Kanalisation in Dichtelementen
Glaziale Rinnenbildung*	Quellen des Bentonits*
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B2 und C: *Konvergenz, Fluiddruck, Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* werden anders ausgeprägt sein als in der Variante B1. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### **2.19.2.6 Streckenverschlüsse**

Die Streckenverschlüsse üben lokal einen Stützdruck auf die Hohlraumkontur aus und wirken sich so auf die Spannungsverhältnisse im Salzgebirge aus. Die Verschlüsse sind in allen (Endlager-) Varianten identisch. Durch die verschiedenen thermischen und mechanischen Einwirkungen werden aber die Eigenschaften der Verschlussmaterialien unterschiedlich beeinflusst.

Variante B1: Die Streckenverschlüsse sind gemäß dem (Sicherheits-) *Erdbeben* und den während der Funktionsdauer zu erwartenden Salzhebungsbeträge (*Diapirismus*) ausgelegt.

Die mechanischen Eigenschaften der Streckenverschlüsse werden durch das *Verschlussmaterial* und die mögliche *Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse* beeinflusst.

Die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Wirtsgestein, die durch die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Gebirges infolge der wärmeentwickelnden Abfälle beeinflusst wird, wirkt sich durch die *Konvergenz* auf die Verschlüsse aus. Aus dem *Fluiddruck* kann sich ebenfalls ein Stützdruck ergeben, der auf die Hohlraumkontur wirkt. Die mechanischen und hydraulischen Lasten sowie die Volumenänderungen von Baumaterialien werden bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt.

Variante B2 und C: *Konvergenz, Fluiddruck, Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* werden aufgrund der abweichenden Endlagerkonfigurationen anders ausgeprägt sein als in der Variante B1. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.144** Beeinflussende FEP für das FEP *Streckenverschlüsse*

Beeinflussende FEP	
Erdbeben*	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Diapirismus*	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Alteration von Strecken- oder Schachtverschlüssen	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.19.2.7 Sonstige Verschlussbauwerke

Die Sonstigen Verschlussbauwerke üben lokal einen Stützdruck auf die Hohlraumkontur aus und wirken sich so auf die Spannungsverhältnisse im Salzgebirge aus.

Für die Varianten B1 und B2 sind nur die Dichtpfropfen zu betrachten, für die Variante C zusätzlich noch der Bohrlochverschlusspfropfen. Durch die verschiedenen thermischen und mechanischen Einwirkungen werden die Eigenschaften der Barrieren unterschiedlich beeinflusst.

Variante B1: Die beeinflussenden FEP und ihre Bewertung sind – abgesehen von den streckenverschlusspezifischen FEP – weitgehend identisch mit dem FEP *Streckenverschlüsse* (s. o.). Aufgrund der Nähe der Dichtpfropfen zu den Einlagerungsstrecken und die daraus resultierenden hohen Temperaturen nach der Einlagerung ist hier aber auch eine Beeinflussung durch die *Thermochemische Sulfatreduktion* möglich.

Varianten B2 und C: *Konvergenz, Fluiddruck, Thermische Expansion oder Kontraktion, Auflockerungszone, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie *Thermochemische Sulfatreduktion* werden anders ausgeprägt sein als in der Variante B1. In der Variante C ist weiterhin noch die *Bohrlochverrohrung* zu berücksichtigen, die verhindert, dass der Gebirgsdruck unmittelbar auf den Behälter einwirkt. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

**Tab. 2.145** Beeinflussende FEP für das FEP *Sonstige Verschlussbauwerke*

Beeinflussende FEP	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*
Erdbeben*	Ausfall eines Dichtpfropfens
Diapirismus*	Kanalisation in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Bohrlochverrohrung*	Auflockerungszone
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	Thermochemische Sulfatreduktion*
Thermische Expansion oder Kontraktion*	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.19.2.8 Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften

Die Technischen Einrichtungen umfassen auch den Streckenausbau durch Spritzbeton, Gleitbogausbau (Stahl, Kunststoffversiegelung), Anker und Stahlnetze sowie Betonfundamente von technischen Geräten und den Fahrbahnbau. Alle diese Ausbaumaßnahmen beeinflussen die Spannungen im Gebirge.

**Tab. 2.146** Beeinflussende FEP für das FEP *Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften*

Beeinflussende FEP	Salzgruskompektion*
Diapirismus*	Metallkorrosion
Inventar: Metalle	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Inventar: Organika	Zersetzung von Organika
Inventar: Sonstige Stoffe*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Die technischen Einrichtungen sind in den (Endlager-) Varianten weitgehend identisch. In den Einlagerungsbereichen wird auf Einbauten so weit wie möglich verzichtet bzw.

die Einbauten werden hier vor dem Verfüllen und Abwerfen entfernt. Durch die verschiedenen thermischen und mechanischen Einwirkungen in den verschiedenen Varianten werden aber die Eigenschaften der Einrichtungen unterschiedlich beeinflusst.

Variante B1: Die mechanischen Eigenschaften der technischen Einrichtungen hängen von den Baustoffen ab (*Inventar: Metalle, Inventar: Sonstige Stoffe*) und werden darüber hinaus durch die Salzbewegungen im Zuge des *Diapirismus* sowie Korrosionsprozesse verändert. Die mechanischen Lasten werden durch die *Konvergenz*, die *Salzgruskompaktion*, die *Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie die *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* bestimmt.

Varianten B2 und C: *Konvergenz, Thermische Expansion oder Kontraktion, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie *Thermochemische Sulfatreduktion* werden aufgrund der unterschiedlichen Endlagerkonfigurationen anders ausgeprägt sein als in der Variante B1. Außerdem ist zu prüfen, inwieweit chemische Prozesse (*Metallkorrosion, Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*) durch die Temperaturen beeinflusst werden. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### **2.19.2.9 Bohrlochverrohrung**

Die Bohrlochverrohrung wird entsprechend den Spannungsverhältnissen im Gebirge ausgelegt. Falls die mechanische Stabilität z. B. durch chemische Einwirkungen (*Metallkorrosion*) reduziert wird, kann es zu einem *Ausfall der Bohrlochverrohrung* kommen.

Die FEP sind nur für die Variante C relevant.

Im Hinblick auf die Ausprägung der Spannungsverhältnisse sind für das FEP *Bohrlochverrohrung* das Material der Verrohrung (*Inventar: Metalle*), die Auslegung der *Sonstigen Verschlussbauwerke* (Bohrlochverschlusspfropfen), die *Konvergenz*, der *Fluiddruck*, die *Metallkorrosion* und die *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* (können beide die mechanische Stabilität der Verrohrung beeinflussen), die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Materials sowie die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Gebirge relevant.

**Tab. 2.147** Beeinflussende FEP für das FEP *Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*
Erdbeben*	Metallkorrosion
Diapirismus*	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Inventar: Metalle	Wärmeproduktion
Versatz*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Sonstige Verschlussbauwerke*	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Radiolyse
Konvergenz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck*	Hebung oder Senkung von Endlagerbehältern

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.19.2.10 Ausfall einer Bohrlochverrohrung

Die Bohrlochverrohrung wird für eine Funktionsdauer von 500a gegen mechanische (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Konvergenz*) und hydraulische (*Fluiddruck*) Lasten ausgelegt. Falls die mechanische Stabilität der *Bohrlochverrohrung* z. B. durch chemische Einwirkungen (*Metallkorrosion, Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*) reduziert wird, kann es zu einem *Ausfall der Bohrlochverrohrung* kommen. Die Einwirkungen des *Diapirismus* sind über die kurze Funktionsdauer nicht relevant.

Das FEP ist nur für die Variante C relevant.

**Tab. 2.148** Beeinflussende FEP für das FEP *Ausfall einer Bohrlochverrohrung*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Metallkorrosion
Diapirismus*	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
Bohrlochverrohrung*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Konvergenz*	Fluiddruck*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.19.2.11 Konvergenz

Nach der Auffahrung von Hohlräumen setzen aufgrund der Gebirgsspannungen konvergenzbedingte Verformungen an der Hohlraumkontur ein. Durch die Konvergenz wird der Salzgrusversatz kompaktiert und somit ein Stützdruck aufgebaut, der wiederum auf das Gebirge wirkt und die Konvergenzrate reduziert. Nach Erreichen isotroper Spannungszustände wird die Konvergenz zum Stillstand gelangen.

Aufgrund des unterschiedlichen Temperaturfeldes und den resultierenden thermomechanischen Spannungen wird das FEP in den verschiedenen Varianten unterschiedlich ausgeprägt sein.

**Tab. 2.149** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*

Beeinflussende FEP	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften*
Inventar: Sonstige Stoffe*	Bohrlochverrohrung*
Versatz*	Ausfall einer Bohrlochverrohrung*
Verschlussmaterial*	Fluiddruck*
Schachtverschlüsse*	Salzgruskompaktion*
Streckenverschlüsse*	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Wirtsgestein*
Sonstige Verschlussbauwerke*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der Stützdruck, der auf die Schachtkontur ausgewirkt wird, und die resultierenden Auswirkungen auf Spannungsverhältnisse und *Konvergenz* hängen von den mechanischen Eigenschaften des *Versatzes* und des *Verschlussmaterials* sowie dem Design der *Streckenverschlüsse*, *Schachtverschlüsse*, *Sonstigen Verschlussbauwerke* und *Technischen Einrichtungen* (Streckenausbau) ab. Bei einer *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* kann die mechanische Stabilität der Verschlüsse reduziert werden, was den Stützdruck und damit die Konvergenz beeinflusst.

Veränderungen des *Fluiddrucks* führen zu Spannungsänderungen im Salinar (z. B. Hohlrauminnendruck) und damit zu einer Beeinflussung des Konvergenzprozesses.

Die *Salzgruskompaktion* übt ebenfalls einen Stützdruck auf die Hohlraumkontur aus. Die Zusammensetzung des Salinars (z. B. Anhydrit- oder Tonlagen im Salz) beeinflussen die Spannungsverhältnisse im *Wirtsgestein* sowie die *Konvergenz* an der Hohlraumkontur.

Varianten B2 und C: *Fluiddruck, Salzgruskompaktion und Spannungsverhältnisse und Spannungsumlagerungen* werden anders ausgeprägt sein als in der Variante B1. In den Variante C sind die FEP *Bohrlochverrohrung* (Konvergenz ist schon vor der Beladung aufgelaufen) sowie *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* zu berücksichtigen. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### 2.19.2.12 Fluiddruck

Fluiddruck und Gebirgsspannungen stehen in enger Wechselwirkung. So können Veränderungen des Fluiddrucks zu Spannungsänderungen im Salinar und damit zu einer Beeinflussung des Konvergenzprozesses führen.

Da der Fluiddruck durch die *Konvergenz* sowie durch die *Lösungen im Grubenbau* und *Gasmenge im Grubenbau* bestimmt wird und diese FEP in den (Endlager-) Varianten verschieden ausgeprägt sind, wird auch der *Fluiddruck* differieren.

**Tab. 2.150** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*

Beeinflussende FEP	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung*	Quellen des Bentonits*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung*	Wärmeproduktion
Konvergenz*	Thermische Expansion oder Kontraktion*
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Lösungen in den Einlagerungsbereichen leiten sich aus der Restfeuchte im Versatz, der Gebirgsfeuchte und mit den Abfallgebänden eingebrachten Lösungen (vor allem vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle) ab. Im Infrastrukturbe-

reich können aus einem Reservoir im Leine-Salz (z3) max. 5.100 m<sup>3</sup> Lösung sowie durch die Schachtverschlüsse geringe Lösungsmengen (einige 100 m<sup>3</sup>) zutreten.

Der Gasdruck wird zunächst durch die eingeschlossene Luft bestimmt. Später wird er durch die Gasbildung (*Mikrobielle Prozesse im Grubenbau, Metallkorrosion und Radio-lyse*) aus der Degradation von Abfallgebinden und technischen Einrichtungen erhöht. Weiteres Gas kann aus den *Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Wirtsgestein* und der *Thermochemischen Sulfatreduktion* resultieren. Falls der Gasdruck die Minimalspannung des Gebirges überschreitet, kann es zur *Druckgetriebenen Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* kommen, wobei die Integrität des Gesteins nicht beeinträchtigt wird.

Durch Volumenänderungen infolge der *Konvergenz* der Hohlraumkontur, durch *Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien*, durch das *Quellen von Bentonit*, durch die *Wärmeproduktion* und durch die *Thermische Expansion oder Kontraktion* des Salzgebirges und der Baustoffe wird der Fluiddruck beeinflusst.

Varianten B2 und C: Aufgrund der abweichenden thermomechanischen Verhältnisse (*Wärmeproduktion, Thermische Expansion oder Kontraktion*) wird die Ausprägung der *Konvergenz* von der Variante B1 abweichen. Aufgrund der unterschiedlichen Mengen an Salzgrusversatz werden auch die damit verknüpften Lösungsmengen verschieden sein.

Bezüglich der *Gasbildung* und der *Gasmenge im Grubenbau* werden für die Varianten aufgrund der geänderten Lösungsmengen und Behältermaterialien nur geringe Unterschiede zur Variante B1 erwartet.

Die *Bohrlochverrohrung* (Variante C) wird entsprechend dem von Innen und Außen wirkenden *Fluiddruck* ausgelegt. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### **2.19.2.13 Salzgruskompaktion**

Durch die Kompaktion des Salzgrus-Versatzes nimmt dessen Festigkeit zu, während sich die Porosität und die Permeabilität reduzieren. Dadurch erzeugt der Salzgrus einen zunehmenden Stützdruck auf die Hohlraumkontur und wirkt so auf die *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* im Gebirge. Aufgrund der Wechselwirkung

mit dem Gebirgsdruck wird dieser Prozess auch in den verschiedenen Varianten unterschiedlich ablaufen.

**Tab. 2.151** Beeinflussende FEP für das FEP *Salzgruskompaktion*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Konvergenz*
Brennelement-Behälter*	Fluiddruck*
Sonstige Endlagerbehälter*	Lösungen im Grubenbau
Versatz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Der Ablauf der *Salzgruskompaktion* hängt primär von den materialspezifischen Eigenschaften des *Versatzes* sowie von der *Konvergenz* ab.

In den Einlagerungsstrecken wird die Salzgruskompaktion durch die mechanische Stabilität der *Brennelement-Behälter* und *Sonstigen Endlagerbehälter* beeinflusst. Der *Fluiddruck* kann den Porendruck erhöhen und so die Salzgruskompaktion verlangsamen.

Geringe Lösungsmengen (*Lösungen im Grubenbau*), wie sie im Referenzszenarium in den Einlagerungsbereichen zu unterstellen sind, können die Salzgruskompaktion beschleunigen. Bei größeren Lösungsmengen, z. B. beim Lösungszutritt aus Laugentaschen, und durch die Konvergenz können sich höhere Lösungsdrücke aufbauen, die der Salzgruskompaktion entgegenwirken. Spannungen im Versatz beeinflussen den Ablauf der Salzgruskompaktion.

Varianten B2 und C: Die FEP *Versatz* (Versatzmenge), *Konvergenz*, *Brennelement-Behälter*, *Sonstige Endlagerbehälter*, *Fluiddruck*, *Lösungen im Grubenbau* (Menge feuchter Salzgrus) und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* werden anders ausgeprägt sein als bei der Variante B1. Alle sonstigen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### **2.19.2.14 Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen**

Volumenänderungen von Barrierenbaustoffen wirken sich auf den Stützdruck an der Hohlraumraumkontur und damit auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus. Von diesen FEP sind für die Spannungsverhältnisse im Gebirge die Salzgruskompaktion,

das Quellen des Bentonits, die verschiedenen Verschlussbauwerke sowie die Konvergenz relevant (siehe 2.19.2.15).

**Tab. 2.152** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung*

<b>Auslösende FEP</b>	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
Salzgruskompaktion*	Streckenverschlüsse*
Quellen des Bentonits*	Sonstige Verschlussbauwerke*
Metallkorrosion	Konvergenz*
Korrosion der Brennstoffmatrix	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Korrosion von Glas	Lösungen im Grubenbau
<b>Beeinflussende FEP</b>	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Inventar: Sonstige Stoffe*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Versatz*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Verschlussmaterial*	Thermochemische Sulfatreduktion*
Schachtverschlüsse*	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.19.2.15 Quellen des Bentonits

Das Quellen des Bentonits wirkt sich auf den Stützdruck an der Hohlraumraumkontur und damit auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus. Da die Verschlussbauwerke und die verwendeten Materialien in allen (Endlager-) Varianten gleich sind, ist das FEP auch für alle Varianten in gleicher Weise relevant.

**Tab. 2.153** Beeinflussende FEP für das FEP *Quellen des Bentonits*

Beeinflussende FEP	Lösungen im Grubenbau
Verschlussmaterial*	Kanalisation in Dichtelementen
Schachtverschlüsse*	Lösungszutritt ins Grubengebäude
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Konvergenz*	Auflockerungszone
Lageverschiebung des Schachtverschlusses*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: *Lösungszutritt ins Grubengebäude* bzw. *Lösungen im Grubenbau* sind Voraussetzungen für das Bentonit-Quellen. Die Wahl des *Verschlussmaterials* und das Design des *Schachtverschlusses* bestimmen die Intensität und den Ablauf des Quellens. Die *Auflockerungszone* kann als initialer Zutrittspfad von Lösungen zur Aufsättigung und zum Quellen des Bentonits beitragen.

Bei einem Zutritt von Lösungen mit Zementkorrosionsprodukten oder hochsalinaren Lösungen wird das Quellvermögen des Bentonits beeinträchtigt (*Geochemisches Milieu im Grubenbau, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*).

Varianten B2 und C: Die FEP *Konvergenz* und *Lösungen im Grubenbau* (Versatzfeuchte: Variante B2: da noch keine komplette Grubengebäudeplanung durchgeführt wurde, Versatzmengen nicht spezifizierbar, Variante C geringere Mengen an feuchtem Salzgrus, in den Einlagerungsbohrlöchern Verfüllsande mit einer Restfeuchte von 0,2 Gew.-%) werden eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben.

### 2.19.2.16 Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Durch eine Lageverschiebung des Schachtverschluss wird der Stützdruck auf die Hohlraumkontur verändert, was sich auch auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge auswirkt.

Es wird erwartet, dass auf Grund des Abstandes zu den Einlagerungsfeldern keine Varianten-spezifischen Unterschiede im Bereich des Schachtes auftreten werden.

**Tab. 2.154** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*

<b>Auslösende FEP</b>	Konvergenz*
Diapirismus*	Fluiddruck*
Thermische Expansion oder Kontraktion*	Sonstige Verschlussbauwerke*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*
Erdbeben*	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Verschlussmaterial*	Quellen des Bentonits*
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Während der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren wird eine Lageverschiebung durch Salzaufstieg (*Diapirismus*) von ca. 1 m erwartet. Der Schachtverschluss wird so ausgelegt, dass es bei diesen Verschiebungen nicht zu einem Ausfall aller drei Dichtelemente kommen wird.

Ein *Erdbeben* kann zu Setzungen in den Schotterwiderlagern unterhalb der Bentonit-Dichtelemente führen. Aufgrund von Betonwiderlagern zwischen Dichtelement und Schottersäule werden sich diese Setzungen nicht auf die Funktion des Dichtelementes auswirken.

Das für die Widerlager und die Dichtelemente verwendete *Verschlussmaterial* und das Barrierendesign sind entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des *Schachtverschlusses*. Die *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen* wird durch die Auslegung begrenzt, so dass für das Referenzszenarium während der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlüsse keine wesentliche Beeinträchtigung der mechanischen Stabilität anzunehmen ist.

Auslaugungen des Wirtsgesteins (*Auflösung und Ausfällung*) sowie hieraus resultierende Instabilitäten der Widerlager und Dichtelemente sind weniger wahrscheinlich und werden daher für das Referenzszenarium nicht unterstellt.

Die *Konvergenz, die Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien* und *das Quellen des Bentonits* tragen zur Einspannung der Verschlüsse bei und wirken sich auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus. Falls sich die Spannungsverhältnisse ändern, so kann dies Auswirkungen auf die Stabilität der Verschlüsse haben.

Varianten B2 und C: Die für das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* relevanten FEP *Konvergenz, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* und *Fluiddruck* werden eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben, so dass auch das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses* anders ausgeprägt sein wird.

### 2.19.2.17 Ausfall eines Dichtpfropfens

Falls die mechanische Stabilität eines Dichtpfropfens infolge eines Ausfalls verringert ist, werden durch den reduzierten Stützdruck auch die Spannungsverhältnisse im angrenzenden Gebirge beeinflusst.

Die Ausprägung dieses FEP kann u. a. von den thermomechanischen Verhältnissen in den Einlagerungsfeldern abhängen und wird daher durch die verschiedenen Varianten beeinflusst.

**Tab. 2.155** Beeinflussende FEP für das FEP *Ausfall eines Dichtpfropfens*

Beeinflussende FEP	Auflösung und Ausfällung
Erdbeben*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Diapirismus*	Auflockerungszone
Sonstige Verschlussbauwerke*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck*	Thermochemische Sulfatreduktion*
Kanalisation in Dichtelementen	

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Durch ein *Erdbeben* können Spannungen im Dichtpfropfen, an der Kontaktzone Gebirge / Barriere und in der Auflockerungszone auftreten und infolge dessen Risse aufreißen. Durch Salzbewegungen (*Diapirismus*) kann der Dichtpfropfen verschoben werden. Je nach der Intensität dieser Bewegungen kann die Funktion des Dichtpfropfens beeinträchtigt werden.

Die Eigenschaften der Dichtpfropfen (*Sonstige Verschlussbauwerke*) bestimmen, ob bzw. wann es zu einem Ausfall eines Dichtpfropfens kommen kann. Falls das zukünftige *Geochemische Milieu im Grubenbau* von der prognostizierten Entwicklung abweicht, kann es zur *Auflösung und Ausfällung* sowie zur *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen* kommen. Hieraus kann bei entsprechender Intensität der Korrosion ein Ausfall der Dichtpfropfen resultieren.

Falls der *Fluiddruck* die bei der Auslegung zugrunde gelegte Intensität überschreitet, kann es zum Ausfall des Dichtpfropfens kommen. Die hydraulische Leitfähigkeit der *Auflockerungszone* ist entscheidend für die Funktion der Dichtpfropfen. Falls sich die Auflockerungszone im Bereich eines Dichtpfropfens nicht in der vorgesehenen Weise schließt, kann es zu Umläufigkeiten und zum Ausfall des Dichtpfropfens kommen.

Falls es zu einer *Thermochemischen Sulfatreduktion* und einem entsprechenden Aufquellen des Baustoffs kommt, so kann der Baustoff aufgelockert und die hydraulische Leitfähigkeit erhöht werden.

Varianten B2 und C: Unter den beeinflussenden FEP werden die FEP *Fluiddruck, Auflockerungszone, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sowie *Thermochemische Sulfatreduktion* aufgrund der anderen Endlagerkonfiguration eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben. Dadurch kann auch das FEP *Ausfall eines Dichtpfropfens* anders ausgeprägt sein. Alle anderen FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

#### **2.19.2.18 Wirtsgestein**

Die rheologischen Eigenschaften der verschiedenen Salinargesteine bestimmen das geomechanische Verhalten und beeinflussen so auch die Spannungsverhältnisse.

Aus den unterschiedlichen Endlagergeometrien der Varianten ergeben sich abweichende Auswirkungen auf das Wirtsgestein.

**Tab. 2.156** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Verdampfen von Wasser
Erdbeben*	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Diapirismus*	Radiolyse
Subrosion	Auflockerungszone
Bildung kryogener Klüfte	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
Glaziale Rinnenbildung*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Konvergenz*	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Auflösung und Ausfällung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Wärmeproduktion	Thermomigration
Thermische Expansion oder Kontraktion*	Thermochemische Sulfatreduktion*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Eigenschaften der verschiedenen Salinargesteine des Wirtsgesteins haben wesentlichen Einfluss auf den Ablauf thermischer, mechanischer, hydraulischer und chemischer Prozesse im Endlagerbereich.

*Erdbeben*, *Salzaufstieg (Diapirismus)* und die *Bildung kryogener Klüfte* verändern die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein. *Subrosion* und *Glaziale Rinnenbildungen* führen zu einem Sedimentabtrag und führen daher, über eine verminderte Auflast, zu einem verringerten Grundspannungszustand.

Bei einem Zutritt ungesättigter oder teilgesättigter Lösungen zum Bergwerk kann es zur Auflösung entsprechender Salzgesteine (*Auflösung und Ausfällung*) und geänderten Spannungsverhältnissen kommen.

Die *Wärmeproduktion* der wärmeentwickelnden Abfälle führt zur *Thermischen Expansion oder* (bei der späteren Abkühlung) *Kontraktion* des umgebenden Wirtsgesteins. In der Folge kann es zu *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* kommen.

*Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* sowie *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* verändern das Verformungsverhalten der Salzgesteine.

Die Volumenzunahme infolge der *Thermochemischen Sulfatreduktion* kann zu lokalen Spannungsspitzen und zum Aufreißen von Rissen führen.

Die Auswirkungen des Verdampfens von Wasser, der strahlungsinduzierten Aktivierung, der Kohlenwasserstoffvorkommen, der Radiolyse, und der Thermomigration auf die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein sind nur von geringer Bedeutung.

Varianten B2 und C: Die FEP *Konvergenz, Wärmeproduktion, Thermische Expansion oder Kontraktion* sowie *Thermochemische Sulfatreduktion* werden eine andere Ausprägung als in der Variante B1 haben.

### 2.19.2.19 Deck- und Nebengebirge

Der Grundspannungszustand des Wirtsgesteins ergibt sich aus dem Deckgebirge, das den Salzstock überlagert.

**Tab. 2.157** Beeinflussende FEP für das FEP *Deck- und Nebengebirge*

Beeinflussende FEP	Permafrost
Erosion	Inlandvereisung in randlicher Lage*
Sedimentation*	Vollständige Inlandvereisung*
Diagenese	Glaziale Rinnenbildung
Diapirismus*	Auflösung und Ausfällung
Transgression oder Regression*	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Alle Varianten: Wichtig für die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein sind alle FEP, die Auflast des Deckgebirges erhöhen oder verringern (*Erosion, Sedimentation, Transgression oder Regression, Inlandvereisung, Glaziale Rinnenbildung* sowie *Auflösung und Ausfällung*).

### 2.19.2.20 Thermochemische Sulfatreduktion

Es handelt sich um eine Redoxreaktion von organischen Verbindungen oder molekularem Wasserstoff mit Sulfaten bei erhöhten Temperaturen unter Bildung von  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und teilweise  $\text{CO}_2$ . Die entstehenden, festen Reaktionsprodukte zeichnen

sich durch eine Volumenzunahme von 10 % /WEB 11/ gegenüber dem Ausgangsmaterial aus. Dadurch werden die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflusst.

**Tab. 2.158** Beeinflussende FEP für das FEP *Thermochemische Sulfatreduktion*

Beeinflussende FEP	Wirtsgestein*
Versatz*	Auflösung und Ausfällung
Wärmeproduktion	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Gasmenge im Grubenbau	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Die Rahmenbedingungen für eine *Thermochemische Sulfatreduktion* sind während der thermischen Phase am Standort Gorleben gegeben: der mittlere Anhydritgehalt im Hauptsalz beträgt 2 – 8 Vol.-%, durch die Versatzfeuchte und die Fluid Inclusions (*Fluidvorkommen im Wirtsgestein*) sind geringe Lösungsmengen vorhanden, außerdem enthält das Hauptsalz geringe Mengen an Kohlenwasserstoff (ca. 0,1 – 0,2 %, *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*) und die Temperatur wird im Nahbereich der Einlagerungsfelder wenige 1000 Jahre über 80 °C liegen (*Wärmeproduktion*). Der Prozess könnte außerdem durch Wasserstoff (*Gasmenge im Grubenbau*) initiiert werden, der bei der Metallkorrosion entsteht.

Varianten B2 und C: Durch die abweichende Anordnung der Einlagerungsfelder und das entsprechende Temperaturfeld (*Wärmeproduktion*) werden andere Wirtsgesteinsbereiche von der *Thermochemischen Sulfatreduktion* betroffen sein. Auch der (Salzgrus-) *Versatz* kann wie das *Wirtsgestein* einer *Thermochemischen Sulfatreduktion* unterliegen.

Da sich die verwendeten Stahlsorten und -mengen der Endlagerbehälter und der Bohrlochverrohrungen sowie die mit dem Salzgrus und den Behältern eingebrachten Lösungsmengen von der Variante B1 unterscheiden, werden auch die durch Metallkorrosion gebildeten *Gasmengen* differieren. Die anderen beeinflussenden FEP entsprechen in ihrer Ausprägung der Variante B1.

### **2.19.3 Nicht berücksichtigte FEP**

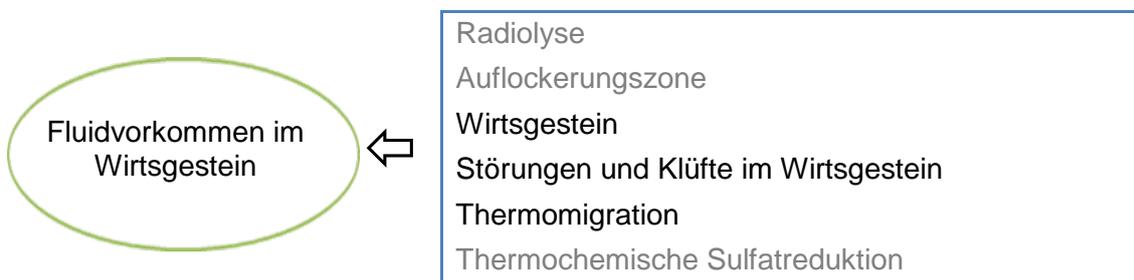
*Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* und *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* sind weniger wahrscheinliche Entwicklungen und daher im Referenzszenarium nicht zu berücksichtigen.

## 2.20 Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Fluide sind natürlich vorkommende Bestandteile eines salinaren Wirtsgesteins. Bei der Bildung von Evaporit-Mineralen werden Fluide in Abhängigkeit von der Kristallisationsgeschwindigkeit und den Sedimentations- bzw. Diagenesebedingungen in die Minerale selbst eingebaut sowie an den Korngrenzen bzw. in den Porenräumen oder in Klüften gespeichert.

Wo vernetzte Fluidvorkommen vorhanden sind, ist eine zumindest partielle Durchströmbarkeit des Wirtsgesteins möglich. Im Einlagerungsbereich des Hauptsalzes sind nur geringe Vorkommen im Wesentlichen als intra- und interkristalline Einschlüsse (Gebirgsfeuchte) vorhanden. Da die Fluidvorkommen unter dem Einfluss der wärmeerzeugenden Abfälle u. U. mobilisiert werden, ergibt sich über die Korrosion eine indirekte Einwirkung auf die Barriere Brennelementbehälter.

Die Ausprägung bezieht sich vor allem auf die Mengen der vorhandenen Fluide. Auch der Chemismus ist für bestimmte Fragestellungen wichtig.



**Abb. 2.20** Ausprägung von Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Die Ausprägung des FEP *Fluidvorkommen im Wirtsgestein* wird im Wesentlichen durch die im Wirtsgestein vorliegende Geometrie permeabler Störungen und Klüfte gesteuert:

**Tab. 2.159** Geometrie permeabler Störungen und Klüfte

<b>Art der Geometrie</b>	<b>Fluidmenge</b>	<b>Stratigraphie</b>
Direkte Zuflüsse und Klüfte mit geringen Weiten	Gesamtzutritt: 261 m <sup>3</sup>	z3OSM (Gorlebenbank)
Ausgedehnte Störungen und ein weitgespanntes Kluftnetz mit großen Weiten der Trennflächen	Gesamtzutritt: 250 m <sup>3</sup>	z3HA (Hauptanhydrit)
Klüfte mit geringen Weiten und ein nur wenig ausgeprägtes Kluftnetz	Gesamtzutritt: 40 m <sup>3</sup> und 3 m <sup>3</sup>	z2/z3-Grenze z3AM (Anhydritmittel)
Fluid Inclusions in impermeablen Bereichen	0,012 – 0,017 Gew.-%	z2HS (Hauptsalz)

Die größten Reservoirvolumen sind in den Gesteinen der Leine-Folge zu erwarten (Hauptanhydrit, Gorlebenbank im Bereich der südlichen Flözaufbeulung: geschätzter Wert 50 m<sup>3</sup> – 5.100 m<sup>3</sup>).

#### **2.20.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

#### **2.20.2 Beeinflussende FEP**

##### **2.20.2.1 Wirtsgestein**

Fluidvorkommen sind mit ihrer charakteristischen Verteilung Bestandteil des Wirtsgesteins. Im Hauptsalz sind bislang nur geringe Fluidmengen festgestellt worden.

**Tab. 2.160** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration*	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.20.2.2 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein sind potentielle Migrationswege und Speicher für Fluide im Wirtsgestein sofern sie entsprechende Wegsamkeiten darstellen. Die Klüfte im Hauptanhydrit enthalten die mengenmäßig größten Fluidvorkommen. Im Hauptsalz sind bisher die kleinsten Fluidvorkommen festgestellt worden.

**Tab. 2.161** Beeinflussende FEP für das FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	
Subrosion	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Fluiddruck	Konvergenz
Diapirismus	Wirtsgestein*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Fluiddruck* kann bestehende Klüfte offenhalten.

*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*: kann zur Bildung von Klüften führen oder sie verhindern.

*Konvergenz* führt zur Verheilung von Klüften und wirkt einer evtl. Neubildung entgegen.

### 2.20.2.3 Thermomigration

Nur geringe Mengen der im Hauptsalz vorhandenen Fluid Inclusions wandern im Nahfeld in Richtung der wärmeerzeugenden Abfälle und gelangen so in das Grubengebäude. Dadurch reduziert sich das Fluidvorkommen im Hauptsalz geringfügig.

**Tab. 2.162** Beeinflussende FEP für das FEP *Thermomigration*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Auflockerungszone
Auflösung und Ausfällung	Wirtsgestein*
Wärmeproduktion	Fluidvorkommen im Wirtsgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Wärmeproduktion*: ist Voraussetzung für eine heterogene Temperaturverteilung, die zu Thermomigration führen kann.

### 2.20.3 Nicht berücksichtigte FEP

*Thermochemische Sulfatreduktion*: Bei der thermochemischen Sulfatreduktion entsteht als Reaktionsprodukt Wasser, was die Menge der Fluidvorkommen im Wirtsgestein (Gebirgsfeuchte) erhöhen kann. Dies gilt für hohe Temperaturen und wenn Kohlenwasserstoffe/Wasserstoff als Reaktionspartner für den Anhydrit bereitstehen. Dies ist nur stellenweise im Übergangsbereich von der Auflockerungszone zum festen Hauptsalzgebirge verwirklicht oder unter der Annahme vorstellbar, dass unter Endlagerbedingungen Kohlenwasserstoffe mobilisiert werden. Da die Thermochemische Sulfatreduktion eher langsam abläuft, ist die zu erwartende Bildung von Wasser im Zeitraum der erhöhten Temperaturen sehr klein.

*Radiolyse*: Die Reichweite der Radiolyse ist zu gering um deutliche Einflüsse auf die Fluide im Wirtsgestein zu haben.

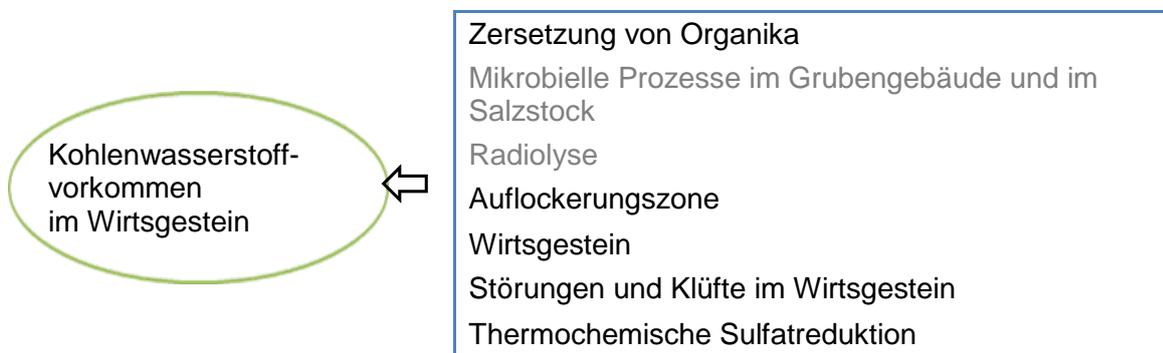
*Auflockerungszone*: Die Auflockerungszone ist durch den Bergwerksbetrieb entstanden und kann als Migrationsweg für Fluide angesehen werden, wo durch die Auffahrung entsprechende Fluidvorkommen aufgeschlossen wurden. Sie beinhaltet aber keine Auswirkungen auf die bestehende Verteilung und Menge der Fluidvorkommen im Wirtsgestein (Wirtsgesteinsmerkmal).

## 2.21 Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffe sind Teil des natürlichen Stoffbestandes des Wirtsgesteins. In Salinargesteinen werden Kohlenwasserstoffe meist auf Korngrenzen oder in Anhydritklüften angetroffen.

Es ist zu prüfen, ob Kohlenwasserstoffe im Falle deutlich erhöhter Konzentrationen Einfluss auf die Barrierenintegrität haben können.

Die Ausprägung bezieht sich auf Menge und Art der Kohlenwasserstoffvorkommen.



**Abb. 2.21** Ausprägung von Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Das Ausmaß der thermochemischen Sulfatreduktion und anderer Mechanismen, die zur Zersetzung der Organika führen, sind bestimmend für die Ausprägung des FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*. Die Ausbildung einer mächtigen Auflockerungszone unterstützt die Zersetzungsprozesse, indem notwendige Reaktionspartner an das Wirtsgestein gelangen können.

Die bislang größten Mengen von Kohlenwasserstoffen wurden in den Klufsystemen des Hauptanhydrits beobachtet. Im Hauptsalz kommen isolierte Kohlenwasserstoffe vor.

### 2.21.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

## 2.21.2 Beeinflussende FEP

### 2.21.2.1 Zersetzung von Organika

Die Zersetzung von Organika kann die Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein reduzieren.

**Tab. 2.163** Beeinflussende FEP für das FEP *Zersetzung von Organika*

Beeinflussende FEP	
Inventar: Organika	Mikrobielle Prozesse im Gruben- gebäude und im Salzstock
Abfallmatrix	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirts- gestein
Lösungen im Grubenbau	Thermochemische Sulfatreduktion*
Geochemisches Milieu im Grubenbau	Wärmeproduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Eine Zersetzung der Kohlenwasserstoffvorkommen (Organika) im intakten Wirtsgestein ist im Einlagerungsbereich prinzipiell durch die thermochemische oder mikrobielle Sulfatreduktion möglich.

### 2.21.2.2 Auflockerungszone

Die Auflockerungszone erhöht die Mobilität der im Wirtsgestein fein verteilten Kohlenwasserstoffe.

Alle genannten FEP können die Ausprägung der Auflockerungszone beeinflussen, was die Mobilität der Kohlenwasserstoffe erhöht. Umgekehrt kann sich die Auflockerungszone zurückbilden wodurch die Kohlenwasserstoffe wieder immobil werden.

**Tab. 2.164** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Auflockerungszone*

<b>Auslösende FEP</b>	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Konvergenz
<b>Beeinflussende FEP</b>	Salzgruskompaktion
Verschlussmaterial	Quellen des Bentonits
Schachtverschlüsse	Thermische Expansion oder Kontraktion
Streckenverschlüsse	Wirtsgestein*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.21.2.3 Wirtsgestein

Die Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein sind Teil der Wirtsgesteinseigenschaften. Die Vorkommen sind an bestimmte Gesteinshorizonte gebunden.

**Tab. 2.165** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone*	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

### 2.21.2.4 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Störungen und Klüfte stellen mögliche Wegsamkeiten für Kohlenwasserstoffe dar, wodurch diese für andere Prozesse verfügbar werden.

**Tab. 2.166** Beeinflussende FEP für das FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	
Subrosion	Wirtsgestein*
Fluiddruck	Konvergenz
Diapirismus	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Fluiddruck* kann bestehende Störungen und Klüfte offenhalten, allerdings behindert er möglicherweise den Transport von Kohlenwasserstoffen.

*Konvergenz* führt zur Schließung und zum Verheilen von Störungen und Klüften.

*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* können zur Bildung oder Schließung von Störungen und Klüften führen.

### 2.21.2.5 Thermochemische Sulfatreduktion

Sofern geeignete Randbedingungen bestehen, ist ein Abbau der Kohlenwasserstoffe durch den Prozess der thermochemischen Sulfatreduktion möglich.

**Tab. 2.167** Beeinflussende FEP für das FEP *Thermochemische Sulfatreduktion*

Beeinflussende FEP	
Versatz	Wirtsgestein*
Wärmeproduktion	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Gasmenge im Grubenbau	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Wärmeproduktion* ist eine wesentliche Voraussetzung für die *Thermochemische Sulfatreduktion* da diese erst ab etwa 80 °C stattfindet.

### **2.21.3 Nicht berücksichtigte FEP**

*Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock* werden unter dem FEP Zersetzung von Organika betrachtet. Sie haben keinen anderen Einfluss auf die Kohlenwasserstoffe im Wirtsgestein.

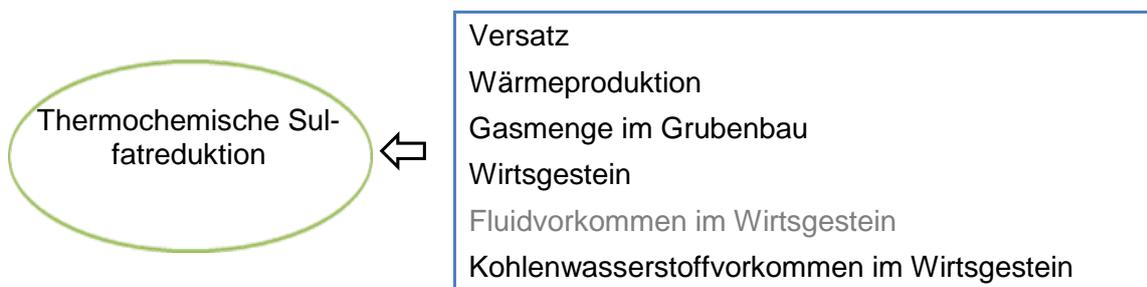
*Radiolyse*: Die Reichweite der Radiolyse ist zu gering, um deutliche Einflüsse auf die Kohlenwasserstoffe im Wirtsgestein zu haben.

## 2.22 Thermochemische Sulfatreduktion

Thermochemische Sulfatreduktion ist eine Redoxreaktion von organischen Verbindungen oder molekularem Wasserstoff mit Sulfaten bei erhöhten Temperaturen unter Bildung von Carbonaten, Sulfiden, Wasser, Schwefelwasserstoff oder  $\text{CO}_2$ .

Eine direkte Einwirkung auf die Initial-Barriere „Wirtsgestein“ ist durch eine Umwandlung (z. B. Sulfatverbrauch, Karbonatbildung) von Wirtsgesteinskomponenten gegeben. Sofern im Nahfeld aus der Reaktion Säuren zur Verfügung stehen, kann die Integrität der Brennelementbehälter indirekt über das geochemische Milieu beeinträchtigt werden.

Die Ausprägung bezieht sich auf die Intensität und die Dauer der thermochemischen Sulfatreduktion



**Abb. 2.22** Ausprägung der Thermochemischen Sulfatreduktion

Die Verfügbarkeit von Kohlenwasserstoffen, die Dauer und Intensität der Wärmeproduktion oder von Wasserstoff produzierenden Prozessen sind bei gegebenen Anhydritgehalten im Hauptsalz eine Voraussetzung für den Ablauf und prägend für das Ausmaß der thermochemischen Sulfatreduktion /WEB 11/.

Wegen nicht abgeschlossener Erkundungsarbeiten (Verbreitung und Größe von Kohlenwasserstoff-Vorkommen außerhalb des EB1) und Untersuchungen zur thermochemischen Sulfatreduktion besteht FuE-Bedarf. Mit Hilfe von Modellierungen kann die Ausprägung der thermochemischen Sulfatreduktion abgeschätzt und überprüft werden, ob die Integrität des Wirtsgesteins bzw. von Brennelement-Behältern bei einer unterstellten thermochemischen Sulfatreduktion gewahrt bleibt.

### 2.22.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.22.2 Beeinflussende FEP

#### 2.22.2.1 Wärmeproduktion

Hohe Temperaturen ab etwa 80 °C sind eine notwendige Voraussetzung für die thermochemische Sulfatreduktion.

**Tab. 2.168** Auslösende FEP für das FEP *Wärmeproduktion*

<b>Auslösende FEP</b>	Radioaktiver Zerfall
-----------------------	----------------------

*Radioaktiver Zerfall* ist Grund und Voraussetzung für die Wärmeproduktion.

#### 2.22.2.2 Gasmenge im Grubenbau

Wasserstoff aus der Radiolyse von Wasser oder der Metallkorrosion (Gasbildung) ermöglichen bei vorhandenem Anhydrit und entsprechenden Temperaturen die thermochemische Sulfatreduktion.

**Tab. 2.169** Beeinflussende FEP für das FEP *Gasmenge im Grubenbau*

<b>Beeinflussende FEP</b>	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein
Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Gasbildung	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Gasbildung* erhöht die Gasmenge im Grubenbau.

*Strömungsvorgänge im Grubengebäude* führen durch Druckausgleich zu einer lokalen Verringerung der Gasmenge.

*Fluidvorkommen im Wirtsgestein* können möglicherweise durch einen Zustrom die Gasmenge im Grubenbau erhöhen.

### 2.22.2.3 Wirtsgestein

Das gleichzeitige Vorkommen, die Menge und die Verteilung von Kohlenwasserstoffen und Anhydrit im Wirtsgestein bestimmen bei Temperaturen über 80 °C das Ausmaß der thermochemischen Sulfatreduktion.

**Tab. 2.170** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion*
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungs-umlagerung	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Störungen und Klüfte im Wirtsgestein* stellen Wegsamkeiten im Wirtsgestein dar und können dadurch Thermochemische Sulfatreduktion begünstigen.

### 2.22.2.4 Versatz

Im als Versatz genutzten Salzgrus vorhandener Anhydrit kann durch thermochemische Sulfatreduktion umgewandelt werden.

*Konvergenz, Salzgruskompaktion* führen zu einer Verringerung der Permeabilität im Versatz wodurch die Edukte schlechter zum Anhydrit gelangen können, was die thermochemische Sulfatreduktion behindert.

*Kanalisation im Salzgrus* macht den im Salzgrus vorhandenen Anhydrit leichter zugänglich und begünstigt so die thermochemische Sulfatreduktion.

*Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock* führen zum Abbau von Anhydrit, was eine thermochemische Sulfatreduktion verhindert.

**Tab. 2.171** Beeinflussende FEP für das FEP *Versatz*

Beeinflussende FEP	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Konvergenz	Wärmeproduktion*
Salzgruskompaktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Verdampfen von Wasser
Lösungen im Grubenbau	Strahlungsinduzierte Aktivierung
Kanalisation im Salzgrus	Radiolyse
Auflösung und Ausfällung	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

#### 2.22.2.5 Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffe ermöglichen bei Vorhandensein von Anhydrit und entsprechenden Temperaturen eine thermochemische Sulfatreduktion.

**Tab. 2.172** Beeinflussende FEP für das FEP *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	
Diapirismus	Wirtsgestein*
Zersetzung von Organika	Thermochemische Sulfatreduktion
Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock	Auflockerungszone

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

*Zersetzung von Organika* führen zu einem Abbau von Kohlenwasserstoffen, die dann nicht mehr für eine evtl. thermochemische Sulfatreduktion zur Verfügung stehen.

Die *Auflockerungszone* mobilisiert Kohlenwasserstoffe und schafft Wegsamkeiten zum Anhydrit was die thermochemische Sulfatreduktion beschleunigt.

### **2.22.3 Nicht berücksichtigte FEP**

*Fluidvorkommen im Wirtsgestein:* Im Hauptsalz des Wirtsgesteins sind Fluid Inclusions vorhanden, die u. a. auch Wasserstoff enthalten. Der Wasserstoff kann zur thermochemischen Sulfatreduktion beitragen, wenn er durch Nahfeldprozesse in Bereiche mit Anhydritvorkommen gelangen würde. Da die Mengen von dem in Fluid Inclusions gebundenen Wasserstoff verglichen mit den Mengen von Kohlenwasserstoffen des Hauptsalzes äußerst gering sind, ist von dem Wasserstoff kein signifikanter Beitrag zum Umfang einer thermochemischen Sulfatreduktion abzuleiten.

## 2.23 Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

Steinsalz-Ablagerungen sind aufgrund ihrer geringen Permeabilität ( $< 10^{-22} \text{ m}^2$ ) für Fluide dicht. Dennoch wird für die wahrscheinliche Entwicklung erwartet, dass die Gas-mengen und die Gasbildungsraten nicht zu einem Gasdruck führen werden, der über dem Gebirgsdruck liegt. Sollte der Gasdruck über den Gebirgsdruck steigen, wird es zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität des Salzgesteins kommen, so dass die gebildeten Gase in das Salzgestein abfließen und hier gespeichert werden /POP 07/. Die Permeabilitätserhöhung des Steinsalzes ist abhängig von der Differenz zwischen Gasdruck und minimaler Hauptspannung im Gebirge und kann mehrere Größenordnungen umfassen. Das Steinsalz wird durch den Gasfluss nicht geschädigt, solange der Gasdruck nicht die hydraulische Aufreißfestigkeit (2 – 4 MPa) übersteigt. Sinkt der Gasdruck wieder unter den Gebirgsdruck, so wird die ursprüngliche Gaspermeabilität des ungestörten Steinsalzes wieder hergestellt.

Dieses FEP ist vor allem in den Endlagerbereichen relevant, in denen eine sehr rasche und intensive Gasbildung erwartet wird. Dies sind im Endlagerkonzept Gorleben die Einlagerungsbereiche für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle im Westflügel des Grubengebäudes (Variante A). Für die Einlagerungsbereiche mit wärmeentwickelnden Abfällen (Varianten B1, B2 und C) wird keine entsprechende Gasbildung erwartet.

Die Fluidinfiltration hat direkte Auswirkungen auf die Funktion der Initial-Barriere „Wirtsgestein“.

Die Ausprägung des FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* ergibt sich aus der Differenz zwischen Gasdruck und minimaler Hauptspannung im Gebirge. Die Intensität der Gasbildung ist durch Modellrechnungen zu ermitteln. Im Folgenden werden daher nur die relevanten Einflüsse qualitativ dargestellt.

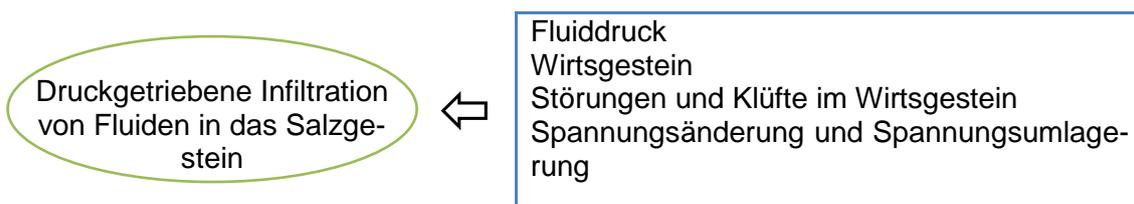
Variante B1: Obwohl Salzformationen für Fluide dicht sind (Permeabilität  $< 10^{-22} \text{ m}^2$ ), wird nicht erwartet, dass die eingeschlossene Grubenluft und die später gebildeten Gase zu einem Gasdruck (*Fluiddruck*) führen werden, der über dem Gebirgsdruck liegt. Der Fluiddruck wird vor allem durch die *Gasbildung* sowie durch die *Konvergenz* bestimmt. Nach Untersuchungen von /POP 07/ ist davon auszugehen, dass es zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität des Salzgesteins und zu einem Abfließen und zu einer Speicherung der Gase im Salzgestein kommen wird, wenn der Gasdruck über

den Gebirgsdruck (minimale Hauptspannung) ansteigt. Die Permeabilitätserhöhung des Steinsalzes ist abhängig von der Differenz zwischen Gasdruck und minimaler Hauptspannung im Gebirge und kann mehrere Größenordnungen umfassen. Daher sind alle Prozesse, die sich auf die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein auswirken, auch für die Fluidinfiltration relevant. Außerdem wird der Infiltrationsprozess durch die Eigenschaften des *Wirtsgesteins* sowie durch *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*, die potenzielle Wegsamkeiten darstellen, beeinflusst.

Das Steinsalz wird durch den Gasfluss nicht geschädigt, solange der Gasdruck nicht die hydraulische Aufreißfestigkeit (2 – 4 MPa) übersteigt. Sinkt der Gasdruck wieder unter den Gebirgsdruck, so wird die ursprüngliche Gaspermeabilität des ungestörten Steinsalzes wieder hergestellt.

Varianten B2 und C: Voraussetzung für die druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein ist, dass der *Fluiddruck* die minimale Hauptspannung des Wirtsgesteins überschreitet. Dafür muss entweder ein starker Lösungszutritt oder eine rasche und intensive Gasbildung auftreten. Beide Entwicklungen werden für die Varianten B2 und C nicht erwartet.

Variante A: Mit den Abfallbinden werden 6.772 t Wasser und organische Abfälle in die westlichen Einlagerungsbereiche eingebracht /PEI 11/. Daher wird hier eine rasche und intensive Gasbildung stattfinden, die zu einem Anstieg des *Fluiddrucks* führen wird.



**Abb. 2.23** Einflussfaktoren auf die druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

### 2.23.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

## 2.23.2 Beeinflussende FEP

### 2.23.2.1 Fluiddruck

Änderungen des Lösungs- oder Gasvolumens im Grubenbau beeinflussen mittelbar über den Fluiddruck den Fluidinfiltrationsprozess. Die wichtigsten Prozesse für Änderungen des Fluiddrucks werden beim Referenzszenarium einerseits die Gasbildung durch *Metallkorrosion*, *Mikrobielle Prozesse im Grubenbau* oder *Radiolyse (Gasmenge im Grubenbau)* und andererseits die *Konvergenz* sein.

**Tab. 2.173** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*

Beeinflussende FEP	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung	Quellen des Bentonits
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Wärmeproduktion
Konvergenz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

Variante B1: Durch die *Wärmeproduktion* kann sich bei verhinderter Ausdehnung der Druck in den Flüssigkeiten ändern. Auch die *Thermische Expansion oder Kontraktion* der Bau- und Versatzstoffe können den Fluiddruck beeinflussen.

Falls der Fluiddruck die minimale Hauptspannung im Gebirge überschreitet, kommt es zur *Druckgetriebenen Infiltration von Fluiden in das Salzgestein*.

Von geringerer Bedeutung sind Volumenänderungen durch das Quellen oder Schrumpfen von Materialien (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*).

Varianten B2 und C: Die FEP *Konvergenz*, *Lösungen im Grubenbau*, *Wärmeproduktion*, *Thermische Expansion oder Kontraktion* und *Gasmenge im Grubenbau* werden eine andere Ausprägung als in der Variante B1 aufweisen und die Ausprägung des Fluiddrucks beeinflussen. *Bohrlochverrohrung* und *Ausfall einer Bohrlochverrohrung* sind nur für die Variante C relevant und beeinflussen die Fluiddruckentwicklung im Nahfeld. Die anderen FEP werden in ihrer Ausprägung der Variante B1 entsprechen.

### 2.23.2.2 Wirtsgestein

Die lithologischen Eigenschaften des Wirtsgesteins (z. B. Homogenität, Anhydritanteil) bestimmen maßgeblich die Ausbildung des intergranularen Porenraums, der für den Ablauf des Fluidinfiltrationsprozesses entscheidend ist.

Die Endlagergeometrien und die resultierenden Temperaturfelder und Spannungsverhältnisse werden das Wirtsgestein im Umfeld der Grubenräume bei den Varianten unterschiedlich beeinflussen.

**Tab. 2.174** Beeinflussende FEP für das FEP *Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	Fluidvorkommen im Wirtsgestein
Thermochemische Sulfatreduktion	Thermische Expansion oder Kontraktion
Thermomigration	Wärmeproduktion
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Auflösung und Ausfällung
Verdampfen von Wasser	Konvergenz
Strahlungsinduzierte Aktivierung	Glaziale Rinnenbildung
Radiolyse	Bildung kryogener Klüfte
Auflockerungszone	Subrosion
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*	Erdbeben
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*	Diapirismus

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Für die Fluidinfiltration sind die beeinflussenden FEP mittelbar relevant, die sich auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge und auf die Entstehung von Wegsamkeiten auswirken. Hierzu gehören *Erdbeben*, *Salzaufstieg (Diapirismus)*, *Subrosion*, die *Bildung kryogener Klüfte* sowie die *Glazigene Rinnenbildung*.

Weiterhin kann es bei einem Zutritt ungesättigter oder teilgesättigter Lösungen zum Bergwerk zur *Auflösung und Ausfällung und Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* im Wirtsgestein kommen.

Die *Wärmeproduktion* der wärmeentwickelnden Abfälle führt zur *Thermischen Expansion* oder (bei der späteren Abkühlung) *Kontraktion* des umgebenden Wirtsgesteins. In

der Folge kann es zu *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* mit entsprechenden Auswirkungen auf die *Konvergenz* kommen.

*Klüfte und Störungen im Wirtsgestein* stellen potenzielle Wegsamkeiten dar und können die Fluidinfiltration in das Wirtsgestein erleichtern. Die Volumenzunahme infolge der *Thermochemischen Sulfatreduktion* kann zu lokalen Spannungsspitzen und zum Aufreißen von Rissen führen.

Die Auswirkungen des *Verdampfens von Wasser*, der *Strahlungsinduzierten Aktivierung*, der *Kohlenwasserstoffvorkommen*, der *Radiolyse*, und der *Thermomigration* auf die Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein sind nur von geringer Bedeutung.

Varianten B2 und C: Die FEP *Konvergenz*, *Wärmeproduktion*, *Thermische Expansion oder Kontraktion* und *Thermochemische Sulfatreduktion* werden eine andere Ausprägung als in der Variante B1 aufweisen, sind aber für die Ausprägung des FEP *Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein* nur von untergeordneter Bedeutung.

Die anderen FEP werden in ihrer Ausprägung der Variante B1 entsprechen.

### 2.23.2.3 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Störungen und Klüfte wirken als bevorzugte Wegsamkeiten, die die Eigenschaften des Steinsalzes drastisch schwächen können und damit die Fluidinfiltration begünstigen.

**Tab. 2.175** Beeinflussende FEP für das FEP *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*

Beeinflussende FEP	
Diapirismus	Wirtsgestein*
Subrosion	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*
Konvergenz	Fluiddruck*

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Variante B1: Ein verstärkter Salzaufstieg (*Diapirismus*) kann zu erneuter Bildung von Störungen und Klüften führen, wenn mit dem Verformungsverhalten der Salzsichten Dilatanz verbunden ist.

Ein variierender *Fluiddruck* im Grubengebäude sowie *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* im Gebirge können zu einer Klüfterweiterung oder zu einem Klüftverschluss beitragen. Durch *Konvergenz* können sich Störungen und Klüfte schließen. Die Zusammensetzung des *Wirtsgesteins* beeinflusst die Bildung von Klüften und Störungen.

Veränderungen am Salzspiegel vorhandener Klüfte durch *Subrosion* sind für die Fluidinfiltration nicht relevant.

Varianten B2 und C: Die FEP *Konvergenz, Fluiddruck und Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* werden eine andere Ausprägung als in der Variante B1 aufweisen. Ob bzw. wie stark sich dies auf die Störungen und Klüfte im Wirtsgestein auswirkt, ist zu prüfen. Die anderen FEP werden in ihrer Ausprägung der Variante B1 entsprechen.

#### **2.23.2.4 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung**

Das Einsetzen der Fluidinfiltration hängt unmittelbar von der kleinsten Hauptspannung ab, die lokal im Grubengebäude unterschiedlich sein kann.

Die verschiedenen Endlagerkonfigurationen werden die Spannungsverhältnisse im Gebirge beeinflussen.

Variante B1: Durch *Erdbeben* oder im Zuge des Salzaufstiegs (*Diapirismus*) können Spannungen insbesondere im Bereich von Materialinhomogenitäten induziert werden.

Der Grundspannungszustand im Gebirge wird außerdem durch mechanische Auflast bzw. Entlastung aufgrund von Eigenschaften des *Deck- und Nebengebirges*, durch eine Erhöhung der Schichtmächtigkeiten durch *Sedimentation* (z. B. während einer Kaltzeit oder während einer Transgression), durch eine Meeresüberflutung infolge einer *Transgression oder Regression*, durch die Gletscherauflast bei einer *Inlandvereisung* oder durch eine Reduzierung der Deckgebirgsmächtigkeit durch *Erosion* infolge *Glazialer Rinnenbildung* verändert und wirkt sich so auf die *Konvergenz* aus.

Die Erwärmung des Salinars durch die wärmeentwickelnden Abfälle führt zur *Thermischen Expansion oder* (bei der anschließenden Abkühlung) *Kontraktion* im Gebirge. In

der Folge werden *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* im Wirtsgestein induziert.

**Tab. 2.176** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

<b>Auslösende FEP</b>	Verschlussmaterial
Erdbeben	Schachtverschlüsse
Sedimentation	Streckenverschlüsse
Diapirismus	Sonstige Verschlussbauwerke
Transgression oder Regression	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Inlandvereisung in randlicher Lage	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Vollständige Inlandvereisung	Ausfall eines Dichtpfropfens
Glaziale Rinnenbildung	Konvergenz
Thermische Expansion oder Kontraktion	Fluiddruck*
<b>Beeinflussende FEP</b>	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Brennelement-Behälter	Salzgruskompaktion
Sonstige Endlagerbehälter	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Versatz	Quellen des Bentonits
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Thermochemische Sulfatreduktion

\*= FEP wird bereits auf der ersten Ebene behandelt

Im Umfeld des Grubengebäudes wird die Gebirgsspannung durch die mechanischen Eigenschaften der Endlagerbehälter, durch die Steifigkeit des Versatzes (Grad der *Salzgruskompaktion*), des *Verschlussmaterials* und der Verschlussbauwerke beeinflusst. Außerdem kann ein entsprechend hoher *Fluiddruck* einen Stützdruck auf das Gebirge ausüben und damit die Spannungsverhältnisse ändern. Die Eigenschaften des *Wirtsgesteins* beeinflussen die Spannungsänderungs- bzw. Spannungsumlagerungsprozesse.

Die *Lageverschiebung eines Schachtverschlusses, das Quellen des Bentonits* sowie die *Technischen Einrichtungen und deren Eigenschaften* sind nur von untergeordneter Bedeutung für die druckgetriebene Infiltration von Fluiden.

Varianten B2 und C: Von den relevanten FEP werden die FEP *Thermische Expansion oder Kontraktion, Versatz* (Salzgrusmenge, Sandverfüllung der Bohrlöcher), *Konvergenz, Fluiddruck, Salzgruskompaktion* und *Nicht thermisch induzierte Volumenänderung* eine andere Ausprägung als in der Variante B1 aufweisen. Einen wesentlichen Einfluss auf die druckgetriebene Infiltration von Fluiden ist das FEP *Fluiddruck*. Die anderen FEP werden in ihrer Ausprägung der Variante B1 entsprechen.

### **2.23.3 Nicht berücksichtigte FEP**

Keine.

## Literatur

- /AHO 89/ Ahorner, L.: Seismologisches Gutachten Gorleben. 178 Seiten, Geologisches Institut der Universität zu Köln. Im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig: Köln, 1989.
- /BAR 11/ Barthelmy, H.: Effects of pressure and purity on the hydrogen embrittlement of steels. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 3, DOI 10.1016/j.ijhydene.2010.05.029, February 2011.
- /BEC 04/ Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). EUR 20621 EN, European Commission, Nuclear Science and Technology: Luxembourg, 2004.
- /BFS 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Verzeichnis der Vorkommen salinärer Lösungen im Erkundungsbergwerk Gorleben sowie in einigen Bereichen des Salzstocks Gorleben (Lösungsverzeichnis Gorleben). 1. Fortschreibung: Datenerfassung bis 30.09.2000, 1183 Seiten, 2002.
- /BIR 10/ Birgersson, M., Karnland, O., Nilsson, E.: Freezing of bentonite: Experimental studies and theoretical considerations. Technical Report TR-10-40, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, 2010.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /CHE 11/ Chernykh, M., Graf, R., Filbert, W.: Kritikalitätssicherheit von CASTOR® - Behältern während der Endlagerung, Jahrestagung Kerntechnik: Berlin, 2011.
- /DÖR 12/ Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert W., Tholen M.: In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben DBE-TEC: Peine, August 2012.
- /EBE 09/ Eberth, S., Müller-Hoeppe, N.: Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine. TEC-30-2008-AB, 02E9521, Übersicht, Abschlussbericht, 244 Seiten, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2009.
- /ENG 11/ 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.
- /KEL 90/ Keller, S.: Das Ablaugungsverhalten der Salzstöcke in NW-Deutschland (Abschluß-Bericht des BMFT-Förderungsvorhabens KWA 5801 9 "Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock", Teilprojekt III). BGR-Bericht, 87 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1990.
- /KIE 98/ Kienzler, B., Vejmelka, P.: Geochemische Modellierung der Korrosion von zementierten Abfallprodukten in Salzlösungen. FZKA 6046, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH: Karlsruhe, 1998.

- /LEY 86/ Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000-1981. Geol. Jb., Vol. E 36, S. 84, 1986.
- /LEY 98/ Leydecker, G., Aichele, H.: The Seismogeographical Regionalisation of Germany: The Prime Example for Third-Level Regionalisation. In: Geologisches Jahrbuch, Vol. E 55, S. 85-98, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1998.
- /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.
- /MIN 10/ Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J.: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. 214 Seiten, BMBF-Projekt FKZ 02C1264, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 2010.
- /MÜL 08/ Müller, B., Ewig, F.: Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. ISTec-A-1301, 44 Seiten: Köln, August 2008.
- /MÜL 09/ Müller, B., Tholen, M.: Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. Atomwirtschaft (Atw), Vol. 5, 2009.
- /MÜL 11/ Müller-Hoeppe, N.: Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse – Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und A). Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Entwurf, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2011.

- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MÜL 12b/ 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.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomaske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2011.
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnelt, H., Minkley, W., Manthei, G.: Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Abschlussbericht der Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 2007.
- /PUS 02/ Pusch, R.: The Buffer and Backfill Handbook, Part 2: Materials and Techniques. SKB Technical Report TR-02-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Stockholm, Dezember 2001.
- /RAU 10/ Rauche, H., Freyer, D., Salzer, K.: Stellungnahme zur Beurteilung der Langzeitstabilität von Sorelbeton unter Berücksichtigung der spezifischen Bedingungen der Schachanlage Asse II. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), ERCOSPLAN, TU Freiberg, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Erfurt, 2010.

- /SCJ 95/ Schroeder, J.H.: Die Kreuzbrückenspalte von Rüdersdorf - subglaziale Erosion im Wellenkalk. Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen, Vol. A, No. 168, S. 177-189, 1995.
- /STA 01/ Stackebrandt, W., Ludwig, A.O., Ostaficzuk, S.: Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas (map 2). In: Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346, Vol. 8, Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G., Stackebrandt, W. (Editoren), S. 13-19, Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge: Kleinmachnow, 2001.
- /STE 96/ Steinwachs, M.: Stellungnahme zu dem "Seismologischen Gutachten Gorleben". Erstellt von der Abteilung Erdbebengeologie des Geologischen Instituts der Universität zu Köln, 31 Seiten, Bericht 113814, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung Hannover (NLfB): Hannover, 1996.
- /WEB 11/ Weber, J.R., Hammer, J., Schulze, O.: Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Projekt Gorleben GE442800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /WEB 13/ Weber, J.R., Hammer, J., Behlau, J., Schulze, O., Heemann, U., Mingerzahn, G., Popp, T.: Offene Klüfte im Zentralbereich des Hauptsalzes im Salzstock Gorleben unwahrscheinlich. Stellungnahme von Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und Institut für Gebirgsmechanik (IFG), 2013.
- /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.

- /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.
- /ZIR 91/ Zirngast, M.: Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben - Ergebnisse einer strukturgeologischen Bearbeitung. In: Geologisches Jahrbuch, Vol. A 132, S. 3-31, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1991.
- /ZIR 96/ Zirngast, M.: The development of the Gorleben salt dome (northwest Germany) based on quantitative analysis of peripheral sinks. In: Salt Tectonics, Vol. 100, Alsop, G.I., Blundell, D.J., Davison, I. (Editoren), S. 203-226, Geological Society Special Publication: London, 1996.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Ausprägung des FEP <i>Diapirismus</i> .....	6
Abb. 2.2	Ausprägung der Subrosion .....	9
Abb. 2.3	Ausprägung der Bildung kryogener Klüfte.....	15
Abb. 2.4	Ausprägung des FEP <i>Glaziale Rinnenbildung</i> .....	18
Abb. 2.5	Abschätzung der Anzahl der Behälter mit unerkannten Fertigungsfehlern mit Hilfe der Binomialverteilung .....	24
Abb. 2.6	Ausprägung des Versagens eines Brenn-Element-Behälters.....	25
Abb. 2.7	Ausprägung der <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> .....	37
Abb. 2.8	Einflussfaktoren auf die <i>Konvergenz</i> .....	54
Abb. 2.9	Einflussfaktoren auf den <i>Fluiddruck</i> .....	72
Abb. 2.10	Einflussfaktoren auf die Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien .....	85
Abb. 2.11	Einflussfaktoren auf die Lageverschiebung des Schachtverschlusses ...	109
Abb. 2.12	Einflussfaktoren auf das Quellvermögen des Betonit .....	125
Abb. 2.13	Einflussfaktoren auf Auflösung und Ausfällung von Salzgestein .....	140
Abb. 2.14	Ausprägung der Metallkorrosion .....	149
Abb. 2.15	Ausprägung der Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen .....	160
Abb. 2.16	Ausprägung des <i>FEP Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme</i> .....	167
Abb. 2.17	Auswirkungen auf die Auflockerungszone .....	173
Abb. 2.18	Ausprägung von Störungen und Klüften im Wirtsgestein .....	192
Abb. 2.19	Einflussfaktoren auf Spannungsänderungen und -umlagerungen.....	201
Abb. 2.20	Ausprägung von Fluidvorkommen im Wirtsgestein .....	233
Abb. 2.21	Ausprägung von Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein .....	237

Abb. 2.22	Ausprägung der Thermochemischen Sulfatreduktion.....	242
Abb. 2.23	Einflussfaktoren auf die druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein.....	248

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Tabelle A.1: Initial-FEP .....	3
Tab. 2.1	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	8
Tab. 2.2	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflösung und Ausfällung</i> .....	10
Tab. 2.3	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	11
Tab. 2.4	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge</i> .....	12
Tab. 2.5	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge</i> .....	13
Tab. 2.6	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderungen und Spannungsumlagerung</i> .....	16
Tab. 2.7	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	17
Tab. 2.8	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Erosion</i> .....	20
Tab. 2.9	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Vollständige Inlandvereisung</i> .....	20
Tab. 2.10	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	21
Tab. 2.11	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Deck- und Nebengebirge</i> .....	22
Tab. 2.12	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Brennelement-Behälter</i> .....	27
Tab. 2.13	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Ausfall einer Bohrlochverrohrung</i> .....	28
Tab. 2.14	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Metallkorrosion</i> .....	30
Tab. 2.15	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme</i> .....	31
Tab. 2.16	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	33
Tab. 2.17	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	38
Tab. 2.18	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> .....	39

Tab. 2.19	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Streckenverschlüsse</i> .....	40
Tab. 2.20	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lageverschiebung des Schachtverschlusses</i> .....	42
Tab. 2.21	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Geochemisches Milieu im Grubenbau</i> .....	43
Tab. 2.22	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge</i> .....	44
Tab. 2.23	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflösung und Ausfällung</i> .....	46
Tab. 2.24	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen</i> .....	46
Tab. 2.25	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflockerungszone</i> .....	48
Tab. 2.26	Auslösende FEP für das FEP <i>Advektion</i> .....	49
Tab. 2.27	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diffusion</i> .....	49
Tab. 2.28	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Versatz</i> .....	55
Tab. 2.29	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlußmaterial</i> .....	58
Tab. 2.30	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> .....	59
Tab. 2.31	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Streckenverschlüsse</i> .....	60
Tab. 2.32	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> .....	61
Tab. 2.33	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Bohrlochverrohrung</i> .....	62
Tab. 2.34	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Ausfall einer Bohrlochverrohrung</i> .....	62
Tab. 2.35	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> .....	63
Tab. 2.36	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Salzgruskompaktion</i> .....	65
Tab. 2.37	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	67
Tab. 2.38	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	67

Tab. 2.39	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Bohrlochverrohrung</i> .....	73
Tab. 2.40	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Ausfall einer Bohrlochverrohrung</i> .....	73
Tab. 2.41	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> .....	74
Tab. 2.42	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen</i> .....	76
Tab. 2.43	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lösungen im Grubenbau</i> .....	77
Tab. 2.44	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Strömungsvorgänge im Grubengebäude</i> .....	78
Tab. 2.45	Auslösende FEP für das FEP <i>Wärmeproduktion</i> .....	79
Tab. 2.46	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermische Expansion oder Kontraktion</i> .....	80
Tab. 2.47	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Gasmenge im Grubenbau</i> .....	81
Tab. 2.48	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein</i> .....	82
Tab. 2.49	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Salzgruskompaktion</i> .....	86
Tab. 2.50	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Quellen des Bentonits</i> .....	88
Tab. 2.51	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Metallkorrosion</i> .....	89
Tab. 2.52	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Versatz</i> .....	90
Tab. 2.53	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	92
Tab. 2.54	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> .....	93
Tab. 2.55	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Streckenverschlüsse</i> .....	94
Tab. 2.56	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> .....	95
Tab. 2.57	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Sonstige Verschlussbauwerke</i> .....	96
Tab. 2.58	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> .....	97

Tab. 2.59	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lageverschiebung des Schachtverschlusses</i> .....	98
Tab. 2.60	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lösungen im Grubenbau</i> .....	100
Tab. 2.61	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Geochemisches Milieu im Grubenbau</i> .....	101
Tab. 2.62	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen</i> .....	103
Tab. 2.63	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	104
Tab. 2.64	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermochemische Sulfatreduktion</i> ....	105
Tab. 2.65	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diapirismus</i> .....	110
Tab. 2.66	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermische Expansion oder Kontraktion</i> .....	110
Tab. 2.67	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	112
Tab. 2.68	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> .....	113
Tab. 2.69	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> .....	114
Tab. 2.70	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> .....	115
Tab. 2.71	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> .....	116
Tab. 2.72	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung</i> .....	118
Tab. 2.73	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Quellen des Bentonits</i> .....	119
Tab. 2.74	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflösung und Ausfällung</i> .....	120
Tab. 2.75	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	121
Tab. 2.76	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	126
Tab. 2.77	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> .....	127

Tab. 2.78	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> .....	129
Tab. 2.79	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> .....	131
Tab. 2.80	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lageverschiebung des Schachtverschlusses</i> .....	132
Tab. 2.81	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lösungen im Grubenbau</i> .....	134
Tab. 2.82	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Lösungszutritt ins Grubengebäude</i> ....	135
Tab. 2.83	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Geochemisches Milieu im Grubenbau</i> .....	136
Tab. 2.84	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflockerungszone</i> .....	137
Tab. 2.85	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	139
Tab. 2.86	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lösungen im Grubenbau</i> .....	142
Tab. 2.87	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Geochemisches Milieu im Grubenbau</i> .....	143
Tab. 2.88	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	145
Tab. 2.89	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	146
Tab. 2.90	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	147
Tab. 2.91	Auslösende FEP für das FEP <i>Wärmeproduktion</i> .....	147
Tab. 2.92	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Komplexbildung</i> .....	148
Tab. 2.93	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Brennelement-Behälter</i> .....	151
Tab. 2.94	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Versagen eines Brennelement-Behälters</i> .....	153
Tab. 2.95	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lösungen im Grubenbau</i> .....	154

Tab. 2.96	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Geochemisches Milieu im Grubenbau</i> .....	155
Tab. 2.97	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflösung und Ausfällung</i> .....	156
Tab. 2.98	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Wärmeproduktion</i> ....	156
Tab. 2.99	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diffusion</i> .....	156
Tab. 2.100	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften</i> .....	157
Tab. 2.101	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Bohrlochverrohrung</i> .....	158
Tab. 2.102	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Ausfall einer Bohrlochverrohrung</i> .....	158
Tab. 2.103	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diffusion</i> .....	162
Tab. 2.104	Auslösende FEP für das FEP <i>Wärmeproduktion</i> .....	162
Tab. 2.105	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Geochemisches Milieu im Grubenbau</i> .....	163
Tab. 2.106	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflösung und Ausfällung</i> .....	164
Tab. 2.107	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lösungen im Grubenbau</i> .....	164
Tab. 2.108	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	165
Tab. 2.109	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Brennelement-Behälter</i> .....	168
Tab. 2.110	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Bohrlochverrohrung</i> .....	169
Tab. 2.111	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Gasmenge im Grubenbau</i> .....	169
Tab. 2.112	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Geochemisches Milieu im Grubenbau</i> .....	170
Tab. 2.113	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Inventar: Sonstige Stoffe</i> .....	174
Tab. 2.114	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	175
Tab. 2.115	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> .....	176

Tab. 2.116	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Streckenverschlüsse</i> .....	177
Tab. 2.117	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> .....	179
Tab. 2.118	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Sonstige Verschlussbauwerke</i> .....	180
Tab. 2.119	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Bohrlochverrohrung</i> .....	181
Tab. 2.120	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Ausfall einer Bohrlochverrohrung</i> .....	181
Tab. 2.121	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> .....	182
Tab. 2.122	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	184
Tab. 2.123	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> .....	185
Tab. 2.124	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Salzgruskompaktion</i> .....	187
Tab. 2.125	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Quellen des Bentonits</i> .....	188
Tab. 2.126	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermische Expansion oder Kontraktion</i> .....	189
Tab. 2.127	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	190
Tab. 2.128	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> .....	193
Tab. 2.129	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	194
Tab. 2.130	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen</i> .....	195
Tab. 2.131	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> .....	196
Tab. 2.132	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Sedimentation</i> .....	202
Tab. 2.133	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diapirismus</i> .....	203
Tab. 2.134	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Transgression oder Regression</i> .....	203
Tab. 2.135	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Inlandvereisung in randlicher Lage</i> .....	204
Tab. 2.136	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Vollständige Inlandvereisung</i> .....	205

Tab. 2.137	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Glaziale Rinnenbildung</i> .....	205
Tab. 2.138	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermische Expansion oder Kontraktion</i> .....	206
Tab. 2.139	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Brennelement-Behälter</i> .....	208
Tab. 2.140	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Sonstige Endlagerbehälter</i> .....	210
Tab. 2.141	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Versatz</i> .....	211
Tab. 2.142	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> .....	212
Tab. 2.143	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> .....	214
Tab. 2.144	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Streckenverschlüsse</i> .....	216
Tab. 2.145	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Sonstige Verschlussbauwerke</i> .....	217
Tab. 2.146	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften</i> .....	217
Tab. 2.147	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Bohrlochverrohrung</i> .....	219
Tab. 2.148	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Ausfall einer Bohrlochverrohrung</i> .....	219
Tab. 2.149	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> .....	220
Tab. 2.150	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> .....	221
Tab. 2.151	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Salzgruskompaktion</i> .....	223
Tab. 2.152	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Nicht thermisch induzierte Volumenänderung</i> .....	224
Tab. 2.153	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Quellen des Bentonits</i> .....	225
Tab. 2.154	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lageverschiebung des Schachtverschlusses</i> .....	226
Tab. 2.155	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Ausfall eines Dichtpfropfens</i> .....	227
Tab. 2.156	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	229
Tab. 2.157	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Deck- und Nebengebirge</i> .....	230
Tab. 2.158	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermochemische Sulfatreduktion</i> .....	231

Tab. 2.159	Geometrie permeabler Störungen und Klüfte.....	234
Tab. 2.160	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	235
Tab. 2.161	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Störungen und Klüfte im Wirtsgestein</i> .....	235
Tab. 2.162	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermomigration</i> .....	236
Tab. 2.163	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Zersetzung von Organika</i> .....	238
Tab. 2.164	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflockerungszone</i> .....	239
Tab. 2.165	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	239
Tab. 2.166	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Störungen und Klüfte im Wirtsgestein</i> .....	240
Tab. 2.167	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Thermochemische Sulfatreduktion</i> ....	240
Tab. 2.168	Auslösende FEP für das FEP <i>Wärmeproduktion</i> .....	243
Tab. 2.169	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Gasmenge im Grubenbau</i> .....	243
Tab. 2.170	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	244
Tab. 2.171	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Versatz</i> .....	245
Tab. 2.172	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein</i> .....	245
Tab. 2.173	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> .....	249
Tab. 2.174	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Wirtsgestein</i> .....	250
Tab. 2.175	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Störungen und Klüfte im Wirtsgestein</i> .....	251
Tab. 2.176	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> .....	253



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## **Anhang B**

### **Weniger wahrscheinliche FEP: Einflüsse auf die Ausprägung**

August 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Beschreibung der Ausprägungen der weniger wahrscheinlichen FEP .....</b>	<b>4</b>
2.1	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen .....	4
2.1.1	Auslösende FEP .....	6
2.1.2	Beeinflussende FEP .....	6
2.1.2.1	Diapirismus.....	6
2.1.2.2	Konvergenz .....	6
2.1.2.3	Metallkorrosion .....	7
2.1.2.4	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen.....	8
2.1.2.5	Zersetzung von Organika.....	9
2.1.2.6	Auflockerungszone .....	10
2.1.2.7	Spannungsänderung und Spannungumlagerung .....	11
2.1.3	Nicht berücksichtigte FEP .....	12
2.2	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses .....	12
2.2.1	Auslösende FEP .....	14
2.2.2	Beeinflussende FEP .....	15
2.2.2.1	Diapirismus.....	15
2.2.2.2	Schachtverschlüsse.....	15
2.2.2.3	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen .....	16
2.2.2.4	Fluiddruck.....	17
2.2.2.5	Lageverschiebung des Schachtverschlusses.....	18
2.2.2.6	Quellen des Bentonits.....	19
2.2.2.7	Auflockerungszone .....	20
2.2.2.8	Spannungsänderung und Spannungumlagerung .....	21
2.2.3	Nicht berücksichtigte FEP .....	23
2.3	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses .....	23
2.3.1	Auslösende FEP .....	25
2.3.2	Beeinflussende FEP .....	25

2.3.2.1	Diapirismus.....	25
2.3.2.2	Streckenverschlüsse.....	26
2.3.2.3	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen .....	27
2.3.2.4	Fluiddruck.....	28
2.3.2.5	Auflockerungszone .....	28
2.3.2.6	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung .....	29
2.3.3	Nicht berücksichtigte FEP .....	31
2.4	Kanalisation in Dichtelementen.....	31
2.4.1	Auslösende FEP .....	32
2.4.2	Beeinflussende FEP .....	32
2.4.2.1	Verschlussmaterial .....	32
2.4.2.2	Schachtverschlüsse.....	33
2.4.2.3	Streckenverschlüsse.....	35
2.4.2.4	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen .....	36
2.4.2.5	Fluiddruck.....	37
2.4.2.6	Lageverschiebung des Schachtverschlusses.....	37
2.4.2.7	Strömungsvorgänge im Grubengebäude .....	38
2.4.2.8	Auflockerungszone .....	39
2.4.3	Nicht berücksichtigte FEP .....	40
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>41</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>43</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>44</b>

# 1 Einführung

Eine wesentliche Größe in der Szenarientwicklung stellen die Ausprägungen der weniger wahrscheinlichen FEP dar, die sich erst durch die Verbindung mit in Wechselwirkung stehenden anderen FEP erklären bzw. ableiten lassen. Der vorliegende Anhang B beschreibt diese Verbindung und ist als vertiefende Ergänzung zum Abschlussbericht zur Szenarientwicklung /BEU 12/ zu sehen. Es wird daher empfohlen, den Anhang erst dann als weiterführende Referenz zu nutzen, wenn man mit den Inhalten aus dem Bericht zur Szenarientwicklung vertraut ist.

Der Anhang B beinhaltet die ausführliche Darstellung der weniger wahrscheinlichen FEP in Bezug auf ihre Wechselwirkung mit auslösenden und beeinflussenden FEP. Die Intention hierbei ist, eine Einschätzung der Ausprägung des jeweiligen betrachteten weniger wahrscheinlichen FEP unter Einbeziehung identifizierter Einflüsse und Wechselwirkungen vornehmen zu können.

Die Ausprägung beinhaltet eine qualitative oder quantitative Charakterisierung der Intensität des jeweiligen weniger wahrscheinlichen FEP, wobei folgende Fälle unterschieden werden können:

- Es kann für die Ausprägung des weniger wahrscheinlichen FEP ein erwarteter Wert oder Wertebereich angegeben werden.
- Es kann eine Ausprägung für das weniger wahrscheinliche FEP angegeben werden, ohne diese jedoch eindeutig einem bestimmten Erwartungswert zuordnen zu können. In solchen Fällen wird eine repräsentative Ausprägung für das weniger wahrscheinliche FEP angegeben.
- Es kann **keine** Ausprägung für das weniger wahrscheinliche FEP angegeben werden, da diese sich aus der jeweils betrachteten Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems erst ergibt.

Die Diskussion, Darstellung und Beschreibung der bezugnehmenden weniger wahrscheinlichen FEP folgt im vorliegenden Anhang B einer systematischen Vorgehensweise und einheitlichen Struktur. Für jedes weniger wahrscheinliche FEP ist folgende Darstellungsweise und inhaltliche Ausgestaltung vorgesehen:

Unter dem entsprechenden Eingangskapitel des weniger wahrscheinlichen FEP erfolgt

- eine kurze Beschreibung des FEP,
- die Benennung der Initial-Barriere(n), die von dem weniger wahrscheinlichen FEP beeinträchtigt werden,
- die Angabe, worauf sich die Ausprägung bezieht,
- eine Übersicht (Tabellenform) von auslösenden und beeinflussenden FEP (1. Ebene) auf das weniger wahrscheinliche FEP und
- eine Bewertung der Ausprägung.

Die Bewertung der Ausprägung wird als Ergebnis, das auf der Basis einer z. T. umfangreichen Diskussion (Gegenstand in den entsprechenden Unterkapiteln) abgeleitet wurde, bereits unter das Eingangskapitel des jeweiligen weniger wahrscheinlichen FEP vorgezogen. Der Grund hierfür ist, frühzeitig die Einschätzung zur Ausprägung des weniger wahrscheinlichen FEP zu vermitteln, ohne dass hierzu eine intensive Auseinandersetzung mit der fachlichen Diskussion erfolgen muss. Dem interessierten Leser bleibt es dann unbenommen, sich einen vertieften Überblick zu den Wechselwirkungen und Einflüssen auf das jeweilige weniger wahrscheinliche FEP zu verschaffen.

In den darauf folgenden Unterkapiteln erfolgt die o. g. Diskussion der Einflüsse auf das weniger wahrscheinliche FEP getrennt nach den einzelnen auslösenden FEP (1. Ebene) und den einzelnen beeinflussenden FEP (1. Ebene). Die hinsichtlich ihres Einflusses vernachlässigbaren FEP der 1. Ebene werden in einem gesonderten Unterkapitel ausgewiesen. D. h., es wird für diese FEP der vernachlässigbare Charakter begründet dargelegt. Weiterhin werden für jedes FEP der 1. Ebene die auslösenden und beeinflussenden FEP der 2. Ebene in die Diskussion mit einbezogen, wobei diejenigen FEP (2. Ebene) mit einem vernachlässigbaren Einfluss kenntlich gemacht werden. In den Fällen, in denen der vernachlässigbare Einfluss nicht eindeutig ist, erfolgt zusätzlich eine entsprechende Begründung.

In der Szenarienentwicklung wurden verschiedene Einlagerungsvarianten betrachtet. Der vorliegende Anhang B berücksichtigt für alle betrachteten Varianten die Einflüsse auf die weniger wahrscheinlichen FEP, wobei der Fokus auf der Einlagerungsvariante AB1 liegt. Die Variante A bleibt in den Einlagerungsvarianten AB2 und AC unverändert. Der Einfluss auf die weniger wahrscheinlichen FEP für die Varianten B2 und C ist in allen Fällen gleich zu den unter B1 gemachten Ausführungen, so dass diese nicht gesondert diskutiert werden.

Die im Anhang B gemachten Angaben zu Zahlenwerten bzw. Wertebereichen wurden – wenn nicht anders ausgewiesen – dem FEP-Katalog /WOL 12/ entnommen.

Im Folgenden werden die in der Tabelle B.1 aufgeführten weniger wahrscheinlichen FEP nach der oben beschriebenen Struktur abgehandelt:

**Tab. 1.1** Weniger wahrscheinliche FEP

<b>FEP-Nr.</b>	<b>FEP-Name</b>	<b>Beeinträchtigte Initial-Barrieren*</b>
1.5.03.01	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	WG
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

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

In den folgenden Tabellen sind FEP von geringer Relevanz jeweils grau dargestellt. Durchgestrichen sind diejenigen FEP, die einen Zirkelschluss ergeben, d. h., die über ein beeinflussendes FEP auf sich selbst wirken.

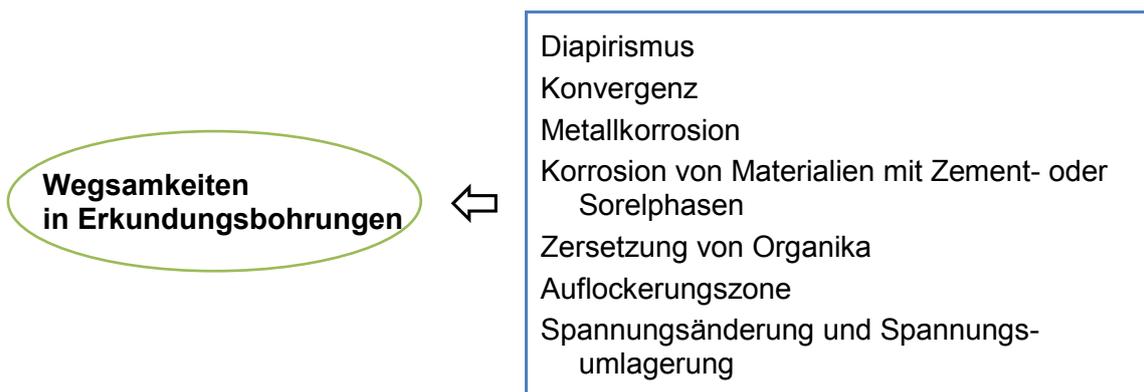
## 2 Beschreibung der Ausprägungen der weniger wahrscheinlichen FEP

### 2.1 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Erkundungsbohrungen sind wie die Grubenbaue des Endlagerbergwerks anthropogene Eingriffe in das Wirtsgestein oder das Deck- und Nebengebirge. Sofern sie mit dem Grubengebäude des Endlagers direkt verbunden sind, werden sie als Teil des Grubengebäudes betrachtet, obwohl sie beispielsweise wegen ihres sofortigen Verschlusses bei der Berechnung der Hohlraumvolumina nicht berücksichtigt werden.

Es werden vier verschiedene Typen von Erkundungsbohrungen mit unterschiedlicher Zielsetzung gestoßen (siehe Anhang D). Von über Tage erfolgten hydrogeologischen Bohrungen, Salzspiegelbohrungen und Tiefbohrungen zur Charakterisierung des Deck- und Nebengebirges und zu einer ersten Übersicht über den Aufbau des Salzstocks. Von unter Tage werden Erkundungsbohrungen gestoßen, um detaillierte Informationen über den Internbau des Salzstocks zu liefern. Alle Arten von Erkundungsbohrungen werden in der Nachverschlussphase als anforderungsgerecht verfüllt angesehen.

Die die Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen beeinflussenden FEP sind in der folgenden Abbildung angegeben und werden im Folgenden diskutiert.



**Abb. 2.1** Die Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen beeinflussenden FEP

Die Ausprägung bezieht sich auf die integrale Permeabilität einer Wegsamkeit in einer Erkundungsbohrung sowie auf den Zeitpunkt der Entstehung.

Diapirismus kann – zum Beispiel auch über Spannungsänderungen im Wirtsgestein – zu einem Öffnen von Wegsamkeiten führen, während die Konvergenz des Gebirges zum Verschließen von Wegsamkeiten beiträgt, sowohl in der Bohrung selbst als auch in der Auflockerungszone. Korrosions- und Zersetzungsprozesse von Materialien, die sich in den Erkundungsbohrungen befinden sowie Spannungsänderungen können zum Entstehen einer Wegsamkeit beitragen. Die Auflockerungszone hat Einfluss auf die integrale Permeabilität einer Wegsamkeit.

Die Verfüllung von Erkundungsbohrungen wird in den wahrscheinlichen Entwicklungen als „dicht“ angesehen, eine Auflockerungszone um diese Bohrungen als verheilt. Das bedeutet, dass die integrale Permeabilität von Erkundungsbohrungen viel geringer ist als diejenige der Wegsamkeiten in verfüllten Grubenbauen inklusive deren Auflockerungszonen. Ein Zahlenwert für die integrale Permeabilität kann in diesem Fall nicht pauschal angegeben werden, sie ist aber durch Vergleich mit den Dichtelementen in den Verschlussbauwerken mit ca.  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  anzunehmen.

Falls eine Wegsamkeit in einer Erkundungsbohrung unterstellt wird, d. h., unter der Annahme, dass dieses FEP eintritt, muss für jede Art von Erkundungsbohrung die integrale Permeabilität abgeschätzt werden, um beurteilen zu können, welche Ausprägung dieses FEP hat. Obwohl die einzelnen Arten von Erkundungsbohrungen in unterschiedlicher Weise verfüllt werden, kann wegen der vergleichbaren Eigenschaften hier auf Erkundungsbohrungen allgemein eingegangen werden. Ein Wert für die integrale Permeabilität einer solchen Wegsamkeit kann nicht abgeleitet werden.

Der Zeitpunkt für die Entstehung einer Wegsamkeit in einer Erkundungsbohrung kann nur geschätzt werden. Spannungsänderungen im Gebirge und Korrosionsprozesse können in relativ kurzen Zeiten zum Entstehen einer Wegsamkeit führen, so dass als ein möglicher Wert der Beginn der Nachverschlussphase anzusehen ist. Andere Prozesse, wie Diapirismus oder Konvergenz, können langsamer ablaufen und zu späteren Zeiten zum Entstehen einer Wegsamkeit führen. Für eine Wegsamkeit in einer Bohrung, die zu sehr späten Zeiten auftritt, sind keine relevanten Auswirkungen auf Lösungsbewegungen im Grubengebäude zu erwarten. Mögliche Auswirkungen können sich für Zeitpunkte, die vor Ende der Funktionsdauer der Strecken- und Schachtverschlüsse (50.000 Jahre) liegen, ergeben.

Die Ausprägung ist für alle drei Einlagerungsvarianten gleich.

### 2.1.1 Auslösende FEP

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### 2.1.2 Beeinflussende FEP

#### 2.1.2.1 Diapirismus

Durch Diapirismus wird das Salzgestein in der Umgebung einer Erkundungsbohrung bewegt. Falls es dabei zu Scherbewegungen kommt, können Wegsamkeiten entstehen.

**Tab. 2.1** Beeinflussende FEP für das FEP *Diapirismus*  
(hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen)

Beeinflussende FEP	
Inlandvereisung in randlicher Lage	Wirtsgestein

Beide das FEP *Diapirismus* beeinflussenden FEP sind in Bezug auf die Entstehung von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen relevant.

#### 2.1.2.2 Konvergenz

Durch Konvergenz können Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen geschlossen werden, sofern sich die Bohrungen im plastischen Medium Steinsalz befinden. Die Konvergenz wird von mehreren FEP beeinflusst, siehe die folgende Tabelle.

**Tab. 2.2** Beeinflussende FEP für das FEP *Konvergenz*  
(hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen)

<b>Beeinflussende FEP</b>	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Sonstige Stoffe	Bohrlochverrohrung
Versatz	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial	Fluiddruck
Schachtverschlüsse	Salzgruskompaktion
Streckenverschlüsse	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Wirtsgestein
Sonstige Verschlussbauwerke	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die Konvergenz beeinflusst das Verhalten der Wegsamkeiten, weniger deren Entstehung. Vor allem die FEP *Fluiddruck*, *Wirtsgestein* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* sind für die Konvergenz im Bereich der Erkundungsbohrungen relevant. Der Fluiddruck ändert den Stützdruck im Bohrloch und beeinflusst damit die Konvergenz. Die Zusammensetzung des Salinars beeinflusst das Konvergenzverhalten des Wirtsgesteins. Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen sowie Konvergenz beeinflussen sich wechselseitig, wobei die Spannungsumlagerungen bereits auf der 1. Ebene berücksichtigt werden.

### 2.1.2.3 Metallkorrosion

Durch Metallkorrosion können nur dann Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen entstehen, wenn sich Metallteile in den Bohrungen befinden. Da davon auszugehen ist, dass höchstens sehr geringe Metallmengen in den Erkundungsbohrungen verbleiben bzw. durch Überbohren nachträglich entfernt werden (z. B. Standrohre), wird dieses FEP als weniger relevant für die Ausprägung von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen angesehen. Die Metallkorrosion wird dabei von mehreren FEP beeinflusst, siehe die folgende Tabelle.

**Tab. 2.3** Beeinflussende FEP für das FEP *Metallkorrosion*  
(hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen)

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Inventar: Metalle	Bohrlochverrohrung
Abfallmatrix	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Brennelement-Behälter	Lösungen im Grubenbau
Sonstige Endlagerbehälter	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Versagen eines Brennelement-Behälters	Auflösung und Ausfällung
Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters	Wärmeproduktion
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Diffusion

Das Inventar der Metalle, das geochemische Milieu im Grubenbau (hier im Erkundungsbohrloch) sowie Auflösung und Ausfällung bestimmen die Korrosion maßgeblich. Die technischen Einrichtungen und deren Eigenschaften sind hier angegeben, weil sie ggf. metallische Komponenten in den Erkundungsbohrungen umfassen können.

#### **2.1.2.4 Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen**

Die Erkundungsbohrungen werden mit unterschiedlichen Materialien verschlossen, die auch Zement- oder Sorelphasen enthalten können, siehe Anhang D. Die Korrosion dieser Materialien kann zu Wegsamkeiten in den Bohrungen führen.

**Tab. 2.4** Beeinflussende FEP für das FEP *Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen*  
(hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen)

<b>Beeinflussende FEP</b>	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
Inventar: Sonstige Stoffe	Lösungen im Grubenbau
Abfallmatrix	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Sonstige Endlagerbehälter	Auflösung und Ausfällung
Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters	Wärmeproduktion
Verschlussmaterial	Radiolyse
Sonstige Verschlussbauwerke	Diffusion

Das Inventar der sonstigen Stoffe beschreibt das Material in den Bohrungen; es beeinflusst die Korrosionsprozesse direkt. Das geochemische Milieu inklusive Auflösung und Ausfällung sowie Diffusion sind für die Korrosion relevante chemische bzw. Transport-FEP.

#### 2.1.2.5 Zersetzung von Organika

Es ist nicht auszuschließen, dass sich in den Erkundungsbohrungen organisches Material (z. B. Kunststoffrohre) befindet. In der folgenden Tabelle sind die beeinflussenden FEP angegeben.

**Tab. 2.5** Beeinflussende FEP für das FEP *Zersetzung von Organika*  
(hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen)

<b>Beeinflussende FEP</b>	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
Inventar: Organika	Wärmeproduktion
Abfallmatrix	Radiolyse
Lösungen im Grubenbau	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
Geochemisches Milieu im Grubenbau	Thermochemische Sulfatreduktion

Das Inventar der Organika und die mikrobiellen Prozesse beeinflussen die Zersetzung unmittelbar. Die thermochemische Sulfatreduktion und die Radiolyse spielen bei den betrachteten Wegsamkeiten keine Rolle, weil Erkundungsbohrungen in ausreichendem

Abstand zu den Einlagerungsstrecken mit den höchsten Temperaturen gestoßen werden. Die Wärmeproduktion beeinflusst die Prozesse in geringem Umfang über die aktuelle Temperatur, und das geochemische Milieu im Grubenbau ist eine wesentliche Randbedingung für die ablaufenden Prozesse.

### 2.1.2.6 Auflockerungszone

Eine Auflockerungszone um das Erkundungsbohrloch hat Einfluss auf dessen integrale Permeabilität, die sich aus der Permeabilität des Bohrlochs und derjenigen der Auflockerungszone zusammensetzt. Eine Auflockerungszone wird von den in der folgenden Tabelle aufgeführten FEP beeinflusst. Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen sowie Konvergenz beeinflussen sich wechselseitig und werden bereits auf der 1. Ebene behandelt.

**Tab. 2.6** Beeinflussende FEP für das FEP *Auflockerungszone*  
(hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen)

Beeinflussende FEP	
Inventar: Sonstige Stoffe	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial	Konvergenz *
Schachtverschlüsse	Salzgruskompektion
Streckenverschlüsse	Quellen des Bentonits
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Thermische Expansion oder Kontraktion
Sonstige Verschlussbauwerke	Wirtsgestein
Bohrlochverrohrung	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Das Bohrlochverfüllmaterial (Inventar sonstiger Stoffe) beeinflusst die Auflockerungszone durch seine mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit). Sofern die Erkundungsbohrung im Steinsalz verläuft, wird die Konvergenz das Verheilen der Auflockerungszone beeinflussen. Die thermische Expansion oder Kontraktion sowie die Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen über die mechanischen Auswirkungen die Auflockerungszone. Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge um die Erkundungsbohrung können zur Ausbildung einer Auflockerungszone führen.

### 2.1.2.7 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Die Wegsamkeiten in den Erkundungsbohrungen werden von Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen beeinflusst. Die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen werden wiederum von den in der folgenden Tabelle aufgeführten FEP ausgelöst oder beeinflusst. Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen sowie Konvergenz beeinflussen sich wechselseitig.

**Tab. 2.7** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*  
(hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen)

<b>Auslösende FEP</b>	
Erdbeben	Inlandvereisung in randlicher Lage
Sedimentation	Vollständige Inlandvereisung
Diapirismus*	Glaziale Rinnenbildung
Transgression oder Regression	Thermische Expansion oder Kontraktion
<b>Beeinflussende FEP</b>	
Brennelement-Behälter	Fluiddruck
Sonstige Endlagerbehälter	Salzgruskompektion
Versatz	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Verschlussmaterial	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Schachtverschlüsse	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Streckenverschlüsse	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Sonstige Verschlussbauwerke	Ausfall eines Dichtpfropfens
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Quellen des Bentonits
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Konvergenz*	Thermochemische Sulfatreduktion

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die in der Tabelle aufgeführten geologischen FEP beeinflussen die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen mit Ausnahme des Diapirismus – der bereits auf der 1. Ebene behandelt wird – und der Erdbeben nur geringfügig. Falls eine Erkun-

dungsbohrung in der Nähe der Einlagerungsfelder ist, kann die thermische Expansion oder Kontraktion zu Spannungsänderungen führen, die bezüglich der Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen relevant sein können.

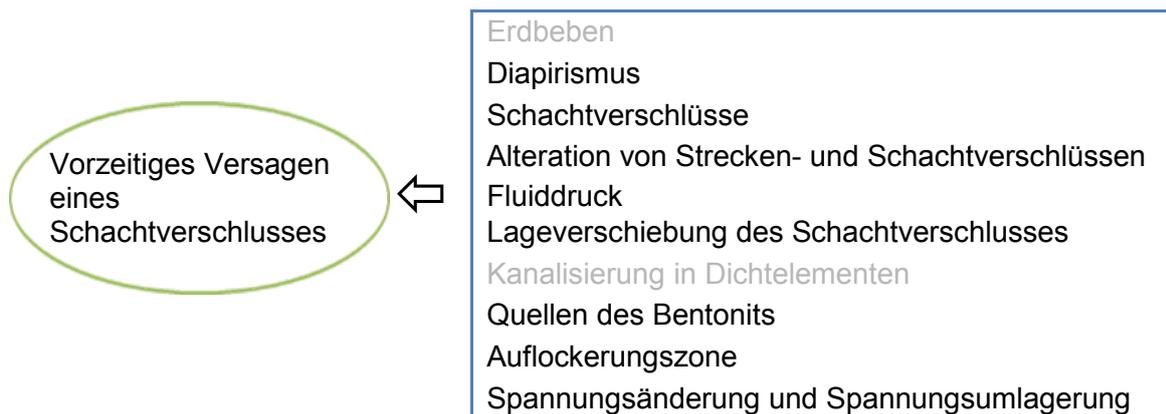
Der Fluiddruck in der Bohrung führt zu einem Stützdruck, der Spannungumlagerungen und Spannungsänderungen beeinflusst. Die eventuell in den Bohrungen vorhandenen technischen Einrichtungen können ebenfalls stützend wirken. Die Eigenschaften des Wirtsgesteins sowie des Deck- und Nebengebirges haben unmittelbaren Einfluss auf die Spannungen in diesen Bereichen.

### 2.1.3 Nicht berücksichtigte FEP

Keine.

## 2.2 Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Die Schachtverschlüsse sind für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt /MÜL 12b/, /WOL 12/. Ein vorzeitiges Versagen dieser Verschlüsse ist weniger wahrscheinlich. In der folgenden Abbildung sind die FEP zusammengestellt, die das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses beeinflussen und damit die Ausprägung des hier zu betrachtenden FEP bestimmen.



**Abb. 2.2** Zusammenstellung der FEP, die das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses beeinflussen

Obwohl ein Schachtverschluss mehrere Dichtelemente enthält, bezieht sich das vorzeitige Versagen auf das Gesamtsystem aus Dichtelementen, Widerlagern, usw.

Die Ausprägung bezieht sich auf die integrale Permeabilität des Schachtverschlusses sowie auf den Zeitpunkt des vorzeitigen Versagens.

Eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren bedeutet, dass die Durchlässigkeit jedes Schachtverschlusses über diese Zeit gering ist. Als integrale Permeabilität des gesamten Verschlussbauwerkes wird ein zeitlich konstanter Wert angenommen, der aus den Werten für die einzelnen Dichtelemente eines Schachtverschlusses – jeweils inklusive der Kontaktzone und der Auflockerungszone – abgeschätzt werden kann /WOL 12/.

Das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses wird in mehreren weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems betrachtet. Dies sind z. B. die Betrachtung von Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen oder weniger wahrscheinliche Ausprägungen von FEP, die zu einer Alteration des Schachtverschlusses führen. Die im Folgenden diskutierte Ausprägung des FEP deckt diese Fälle ab, ist also repräsentativ.

Das vorzeitige Versagen ist zum einen mit den folgenden FEP verknüpft, jeweils mit der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP:

- Erdbeben,
- Diapirismus,
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen,
- Quellen des Bentonits,
- Auflockerungszone,
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung,
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses,
- Auflösung und Ausfällung,
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen.

Zum anderen ist das vorzeitige Versagen mit den folgenden weniger wahrscheinlichen FEP verknüpft:

- Kanalisierung in Dichtelementen,
- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen.

Weitere FEP beeinflussen das vorzeitige Versagen, siehe die folgende Diskussion.

Im ungünstigsten Fall werden durch diese FEP alle Dichtelemente eines Schachtverschlusses gleichzeitig beeinträchtigt; dies würde zu einem starken Anstieg der integralen Durchlässigkeit führen, wird aber hier als unwahrscheinlich ausgeschlossen. Der weniger wahrscheinliche Fall ist dadurch gekennzeichnet, dass eines der Dichtelemente vorzeitig versagt und dadurch andere Dichtelemente beeinträchtigt werden, z. B. wenn die Bentonit-Dichtung versagt und dadurch Deckgebirgslösung eher an den tiefer gelegenen Dichtelementen aus Salz- und Sorelbeton ansteht und diese schneller korrodieren. Die integrale Permeabilität des gesamten Verschlussbauwerks (bestehend aus den drei Dichtelementen) wird dann zwar erhöht sein, aber nicht so stark wie bei einem gleichzeitigen Versagen aller Dichtelemente.

Das vorzeitige Versagen kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt zwischen dem Beginn der Nachbetriebsphase und dem Ende der Funktionsdauer nach 50.000 Jahren liegen. Die größten Konsequenzen sind bei einem frühzeitigen Versagen anzunehmen, d. h. zum Beginn der Nachbetriebsphase. In diesem Fall gelangen die zufließenden Lösungen wegen des schnelleren Zufließens und der zu diesem Zeitpunkt noch größeren Porenvolumina nach einem Versagen weiter in das Grubengebäude hinein. Spätere Zeitpunkte des vorzeitigen Versagens sind jedoch nicht ausgeschlossen, z. B. nach einer Schädigung durch Diapirismus. Da jedoch die Auswirkungen in diesem Fall anders sein können als bei frühem Versagen (z. B. aufgrund des Aufbaus von Gaspolstern im Grubengebäude), ist auch eine Variante zu betrachten, bei der der Schachtverschluss spät, aber vor dem Ende der vorgesehenen Funktionsdauer, versagt.

Die Ausprägung des FEP ist für die drei Einlagerungsvarianten gleich.

### **2.2.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

## 2.2.2 Beeinflussende FEP

### 2.2.2.1 Diapirismus

Durch Diapirismus wird das Salzgestein in der Umgebung eines Schachtverschlusses bewegt. Falls es dabei zu Scherbewegungen kommt, kann der Verschluss vorzeitig versagen. Es ist davon auszugehen, dass die Beeinträchtigung des Schachtverschlusses durch den Diapirismus auf Teilbereiche, z. B. ein Dichtelement des Schachtverschlusses, begrenzt ist.

**Tab. 2.8** Beeinflussende FEP für das FEP *Diapirismus*  
(hier bezüglich vorzeitigem Versagen eines Schachtverschlusses )

Beeinflussende FEP	
Inlandvereisung in randlicher Lage	Wirtsgestein

Beide das FEP *Diapirismus* beeinflussenden FEP sind in Bezug auf das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses relevant.

### 2.2.2.2 Schachtverschlüsse

Dieses FEP beschreibt das Design sowie die physikalischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften der Schachtverschlüsse. Es beeinflusst daher unmittelbar das potenzielle Versagen.

Die FEP *Erdbeben, Diapirismus, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Fluiddruck, Lageverschiebung des Schachtverschlusses, Kanalisierung in Dichtelementen, Quellen des Bentonits, Auflockerungszone sowie Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* werden bereits auf der 1. Ebene betrachtet. Die Darstellung ihrer Einflüsse auf das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses wird damit abgedeckt.

Subrosion und glaziale Rinnenbildung sind erst nach der Funktionsdauer der Schachtverschlüsse nach 50.000 Jahren von Bedeutung. Ihr Einfluss auf die Schachtverschlüsse braucht daher nicht weiter betrachtet zu werden.

**Tab. 2.9** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses)

Beeinflussende FEP	
Erdbeben*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Diapirismus *	<del>Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses</del>
Subrosion	Lageverschiebung des Schachtverschlusses *
Glaziale Rinnenbildung	Kanalisation in Dichtelementen *
Verschlussmaterial	Quellen des Bentonits *
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen *	Thermische Expansion oder Kontraktion
Konvergenz	Auflockerungszone *
Fluiddruck *	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Falls die Eigenschaften des Verschlussmaterials von den Auslegungswerten abweichen, kann dies zum vorzeitigen Versagen eines Dichtelements führen. Die Konvergenz führt zu einer Einspannung der Dichtelemente, aber auch zu einer Kompaktion der Langzeitdichtung im Verschlussbauwerk. Es wird angenommen, dass der Einfluss der Konvergenz auf das vorzeitige Versagen eines Dichtelements vernachlässigbar klein ist gegenüber anderen Effekten. Die nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien bezieht sich z. B. auf das Verhalten der Sorel- oder Salzbetonbauwerke oder auf die Setzung der Schottersäule. Hier kann es durch ein weniger wahrscheinliches, nicht auslegungskonformes Verhalten zu einem vorzeitigen Versagen eines Dichtelements kommen. Der Einfluss der thermischen Expansion oder Kontraktion, der von der Wärmeentwicklung der Abfälle herrührt, ist im Schachtbereich vernachlässigbar gering. Eine Kontraktion aufgrund von Eiszeiten kann erst nach der Funktionsdauer der Schachtverschlüsse von 50.000 Jahren auftreten und wird daher nicht weiter betrachtet.

### 2.2.2.3 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Die Alteration der Schachtverschlüsse bei der unterstellten Systementwicklung wird bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt, so dass sie bei den wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems nicht zu einem vorzeitigen Ausfall der Schacht-

verschlüsse führen kann. Falls die Alteration zu einem vorzeitigen Versagen führt, muss mindestens eines der in der folgenden Tabelle angegebenen FEP eine weniger wahrscheinliche Ausprägung haben.

**Tab. 2.10** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*  
(hier bezüglich vorzeitigem Versagen eines Schachtverschlusses)

<b>Beeinflussende FEP</b>	Kanalisation in Dichtelementen *
Verschlussmaterial	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Schachtverschlüsse *	Auflösung und Ausfällung
Streckenverschlüsse	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Auflockerungszone *
<del>Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses</del>	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Advektion
Lageverschiebung des Schachtverschlusses*	Diffusion

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die Eigenschaften des Verschlussmaterials bestimmen die Alteration. Die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen führt direkt zu einer Alteration der Verschlüsse. Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen können über mechanische Einwirkungen die Alteration beeinflussen. Das geochemische Milieu im Grubengebäude sowie die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge bestimmen unter Einfluss von Advektion und Diffusion die Prozesse, die zur (chemischen) Alteration der Verschlüsse führen, z. B. über die Auflösung und Ausfällung.

#### 2.2.2.4 Fluiddruck

Unter extremen Bedingungen, z. B. bei Druckgradienten über den Schachtverschluss, die größer sind als nach der Auslegung zugelassen, kann der Fluiddruck das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses beeinflussen. Da der Fluiddruck aber eine berechnete, zeitabhängige Größe ist, kann im Rahmen der Szenarienentwicklung keine Ausprägung angegeben werden.

**Tab. 2.11** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses)

<b>Beeinflussende FEP</b>	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung	Quellen des Bentonits*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Wärmeproduktion
Konvergenz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

#### **2.2.2.5 Lageverschiebung des Schachtverschlusses**

Durch eine Lageverschiebung ist es möglich, dass der Schachtverschluss durch mechanische Einwirkungen vorzeitig versagt, d. h. dass es zu einem Konturabriss kommt. Die in der folgenden Tabelle angegebenen FEP lösen eine Lageverschiebung aus oder beeinflussen sie. Die Auswirkungen des sehr langsam ablaufenden Diapirismus und eines Erdbebens auf ein vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses werden bereits auf der 1. Ebene diskutiert und brauchen hier nicht weiter betrachtet zu werden.

**Tab. 2.12** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses)

<b>Auslösende FEP</b>	
Diapirismus*	Thermische Expansion oder Kontraktion
<b>Beeinflussende FEP</b>	Fluiddruck*
Erdbeben*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Verschlussmaterial	<del>Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses</del>
Schachtverschlüsse*	Quellen des Bentonits*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflösung und Ausfällung
Konvergenz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die thermische Expansion oder Kontraktion des Gebirges infolge des Wärmeeintrags der eingelagerten Abfälle kann eine Lageverschiebung auslösen. Die mechanischen Eigenschaften des Verschlussmaterials, insbesondere der Widerlager und der Schotter säulen, beeinflussen eine Lageverschiebung. Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen, die Konvergenz sowie das Quellen des Bentonits führen zu einer Einspannung der Dichtelemente im Gebirge. Bei Überschreiten der Kenngrößen /MÜL 12a/ kann jedoch eine Lageverschiebung beeinflusst werden.

#### 2.2.2.6 Quellen des Bentonits

Das Quellen des Bentonits ist eine nicht thermisch induzierte Volumenänderung. Vom Quellen des Bentonits hängt die Funktion der oberen Dichtelemente in den Schachtverschlüssen ab. Falls der Bentonit nicht wie gefordert quillt, kann dies zu einem vorzeitigen Versagen des Schachtverschlusses insgesamt beitragen.

**Tab. 2.13** Beeinflussende FEP für das FEP *Quellen des Bentonits*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses)

Beeinflussende FEP	Lösungen im Grubenbau
Verschlussmaterial	Kanalisation in Dichtelementen*
Schachtverschlüsse*	Lösungszutritt ins Grubengebäude
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen *	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Konvergenz	Auflockerungszone*
Lageverschiebung des Schachtverschlusses*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die Eigenschaften des Verschlussmaterials (Bentonit) bestimmen die Quellfähigkeit. Durch Konvergenz wird eine Einspannung des Dichtelements im Gebirge erreicht und dadurch das Quellen des Bentonits beeinflusst. Die Lösungen im Grubenbau, das geochemische Milieu im Grubenbau und der Lösungszutritt ins Grubengebäude bestimmen die Aufsättigung des Bentonits sowie die chemischen Bedingungen, unter denen das Quellen des Bentonits abläuft.

### 2.2.2.7 Auflockerungszone

Eine Auflockerungszone um den Schachtverschluss hat Einfluss auf dessen integrale Permeabilität, d. h. die Permeabilität, die sich aus der Kombination über den Schachtverschluss (inklusive der Kontaktzone) und die Auflockerungszone bildet, sowie auf den Transport von Reaktanden, z. B. bei der Alteration der Schachtverschlüsse. Eine Auflockerungszone wird von den in der folgenden Tabelle aufgeführten FEP beeinflusst. Eine entsprechende Ausprägung der Auflockerungszone kann zum vorzeitigen Versagen eines Schachtverschlusses beitragen.

**Tab. 2.14** Beeinflussende FEP für das FEP *Auflockerungszone*  
(hier bezüglich vorzeitigem Versagen eines Schachtverschlusses)

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Inventar: Sonstige Stoffe	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial	Konvergenz
Schachtverschlüsse*	Salzgruskompaktion
Streckenverschlüsse	Quellen des Bentonit *
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Sonstige Verschlussbauwerke	Wirtsgestein
Bohrlochverrohrung	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die mechanischen Eigenschaften des Verschlussmaterials charakterisieren den Verschluss und beeinflussen die Auflockerungszone um dieses Material. Die Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen die Entstehung und Art der Auflockerungszone. Über thermische Expansion oder Kontraktion als Folge des Wärmeeintrags der eingelagerten Abfälle können Auflockerungszonen entstehen oder beeinflusst werden. Durch das Quellen des Bentonits und Konvergenz des umgebenden Gebirges wird eine Auflockerungszone über die Zeit geschlossen; bei hohen Quelldrücken können jedoch auch Risse im Bentonit entstehen.

### 2.2.2.8 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Die Schachtverschlüsse werden von Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein und im Bauwerk beeinflusst. Bei entsprechender Ausprägung kann es dabei zu einem vorzeitigem Versagen eines Schachtverschlusses kommen. In der folgenden Tabelle sind die FEP zusammengestellt, die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen auslösen bzw. beeinflussen.

Die Auswirkungen eines Erdbebens und des sehr langsam ablaufenden Diapirismus werden bereits auf der 1. Ebene behandelt und daher hier nicht weiter diskutiert. Die Auswirkungen der Sedimentation sowie der Transgression oder Regression auf das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses sind während der Funktionsdauer des Schachtverschlusses gering. Die FEP, die im Zusammenhang mit Kaltzeiten stehen,

treten erst nach der Funktionsdauer des Schachtverschlusses auf und brauchen daher nicht weiter betrachtet zu werden.

**Tab. 2.15** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses)

<b>Auslösende FEP</b>	
Erdbeben*	Inlandvereisung in randlicher Lage
Sedimentation	Vollständige Inlandvereisung
Diapirismus*	Glaziale Rinnenbildung
Transgression oder Regression	Thermische Expansion oder Kontraktion
<b>Beeinflussende FEP</b>	
Brennelement-Behälter	Fluiddruck *
Sonstige Endlagerbehälter	Salzgruskompaktion
Versatz	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Verschlussmaterial	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses *
Schachtverschlüsse*	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Streckenverschlüsse	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Sonstige Verschlussbauwerke	Ausfall eines Dichtpfropfens
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Quellen des Bentonits*
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Konvergenz	Thermochemische Sulfatreduktion

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Eine thermische Expansion oder Kontraktion durch den Wärmeeintrag der eingelagerten Abfälle sowie die Konvergenz führen zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Bereich der Schachtverschlüsse. Diese Effekte werden durch die Eigenschaften des Wirtsgesteins sowie des Deck- und Nebengebirges beeinflusst. Die Eigenschaften des Versatzes und des Verschlussmaterials beeinflussen die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen innerhalb der Verschlüsse, die auch durch Salzgruskompaktion und nicht thermisch induzierte Volumenänderungen beein-

flusst sind. Die Auswirkungen der thermochemischen Sulfatreduktion sind im Bereich der Schachtverschlüsse gering, da dort nur geringe Temperaturen auftreten.

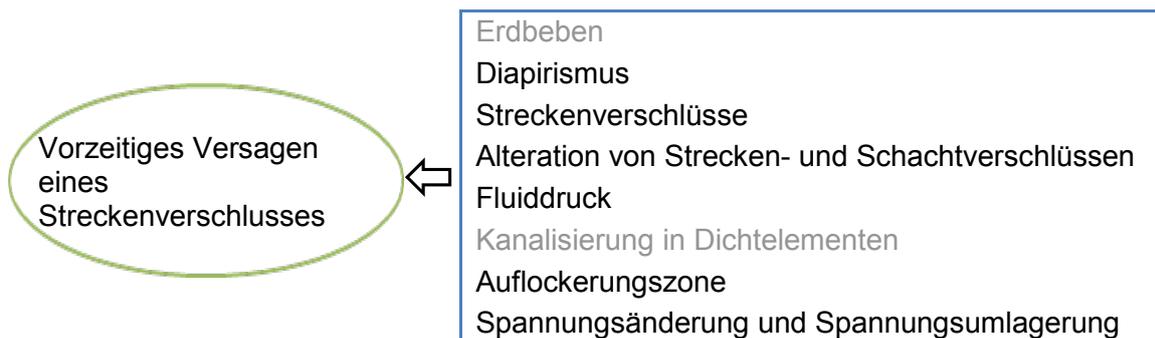
### 2.2.3 Nicht berücksichtigte FEP

Erdbeben: Ein Erdbeben mit der maximalen Intensität, die im Nachweiszeitraum als wahrscheinlich eingestuft ist, wird bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt (Bemessungs-Erdbeben bis zur Stärke 7,3 MSK /WOL 12/). Stärkere Erdbeben brauchen bezüglich des vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses nicht berücksichtigt zu werden.

Kanalisation in Dichtelementen: die Auswirkungen dieses FEP auf das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses werden in Kapitel 0 behandelt.

### 2.3 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Die Streckenverschlüsse sind für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt /MÜL 12b/, /WOL 12/. Ein vorzeitiges Versagen dieser Verschlüsse ist weniger wahrscheinlich. In der folgenden Abbildung sind die FEP zusammengestellt, die das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses beeinflussen und damit die Ausprägung des hier zu betrachtenden FEP bestimmen.



Obwohl ein Streckenverschluss zwei Dichtelemente enthält, bezieht sich das vorzeitige Versagen auf das Gesamtsystem aus den beiden Dichtelementen und den Widerlagern.

Die Ausprägung bezieht sich auf die integrale Permeabilität des Streckenverschlusses sowie auf den Zeitpunkt des vorzeitigen Versagens.

Da die Streckenverschlüsse für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahre ausgelegt sind, ist zu erwarten, dass die Durchlässigkeit jedes Streckenverschlusses über diese Zeit gering ist. Als integrale Permeabilität eines gesamten Verschlussbauwerkes wird ein zeitlich konstanter Wert angenommen, der aus den Werten für die einzelnen Dichtelemente – jeweils inklusive Kontaktzone und Auflockerungszone – eines Streckenverschlusses abgeschätzt werden kann /WOL 12/.

Das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses wird in mehreren weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems betrachtet. Dies sind z. B. die Betrachtung von Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen oder weniger wahrscheinliche Ausprägungen von FEP, die zu einer Alteration des Streckenverschlusses führen. Die im Folgenden diskutierte Ausprägung des FEP deckt diese Fälle ab, ist also repräsentativ.

Das vorzeitige Versagen ist zum einen mit den folgenden FEP verknüpft, jeweils mit der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP:

- Erdbeben,
- Diapirismus,
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen,
- Auflockerungszone,
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung,
- Auflösung und Ausfällung,
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen.

Zum anderen ist das vorzeitige Versagen mit den folgenden weniger wahrscheinlichen FEP verknüpft:

- Kanalisierung in Dichtelementen,
- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen.

Weitere FEP beeinflussen das vorzeitige Versagen, siehe die folgende Diskussion.

Im ungünstigsten Fall werden durch diese FEP beide Dichtelemente eines Streckenverschlusses gleichzeitig beeinträchtigt; dies würde zu einem starken Anstieg der

integralen Durchlässigkeit führen, wird aber hier als unwahrscheinlich ausgeschlossen. Der weniger wahrscheinliche Fall ist dadurch gekennzeichnet, dass eines der Dichtelemente vorzeitig versagt und dadurch das andere Dichtelement beeinträchtigt wird, z. B. wenn das zweite Dichtelement schneller korrodiert. Die integrale Permeabilität des gesamten Verschlussbauwerks (bestehend aus den beiden Dichtelementen und den Widerlagern) wird dann zwar erhöht sein, aber nicht so stark wie bei einem gleichzeitigen Versagen beider Dichtelemente.

Das vorzeitige Versagen kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt zwischen dem Beginn der Nachbetriebsphase und dem Ende der Funktionsdauer nach 50.000 Jahren liegen. Die größten Konsequenzen sind bei einem frühzeitigen Versagen anzunehmen, d. h. zum Beginn der Nachbetriebsphase. In diesem Fall gelangen die zufließenden Lösungen wegen des schnelleren Zufließens und der zu diesem Zeitpunkt noch größeren Porenvolumina nach einem Versagen weiter in das Grubengebäude hinein. Spätere Zeitpunkte des vorzeitigen Versagens sind jedoch nicht ausgeschlossen, z. B. nach einer Schädigung durch Diapirismus.

Die Ausprägung des FEP ist für die drei Einlagerungsvarianten gleich.

### **2.3.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

### **2.3.2 Beeinflussende FEP**

#### **2.3.2.1 Diapirismus**

Durch Diapirismus wird das Salzgestein in der Umgebung eines Streckenverschlusses bewegt. Falls es dabei zu Scherbewegungen kommt, kann der Verschluss vorzeitig versagen. Es ist davon auszugehen, dass die Beeinträchtigung des Streckenverschlusses durch den Diapirismus auf Teilbereiche, z. B. ein Dichtelement des Streckenverschlusses begrenzt ist.

**Tab. 2.16** Beeinflussende FEP für das FEP *Diapirismus*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses )

Beeinflussende FEP	
Inlandvereisung in randlicher Lage	Wirtsgestein

Beide das FEP *Diapirismus* beeinflussenden FEP sind in Bezug auf das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses relevant.

### 2.3.2.2 Streckenverschlüsse

Dieses FEP beschreibt das Design sowie die physikalischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften der Streckenverschlüsse. Es beeinflusst daher unmittelbar das potenzielle Versagen.

Die FEP *Erdbeben, Diapirismus, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Fluiddruck, Kanalisierung in Dichtelementen, Auflockerungszone* sowie *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* werden bereits auf der 1. Ebene betrachtet. Die Darstellung ihrer Einflüsse auf das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses wird damit abgedeckt.

**Tab. 2.17** Beeinflussende FEP für das FEP *Streckenverschlüsse*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses )

Beeinflussende FEP	
Erdbeben*	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Diapirismus*	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses*
Verschlußmaterial	Kanalisierung in Dichtelementen*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Konvergenz	Auflockerungszone*
Fluiddruck*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Falls die Eigenschaften des Verschlußmaterials von den Auslegungswerten abweichen, kann dies zum vorzeitigen Versagen eines Dichtelements führen. Die Konvergenz führt zu einer Einspannung der Dichtelemente. Es wird angenommen, dass der

Einfluss der Konvergenz auf das vorzeitige Versagen eines Dichtelements vernachlässigbar klein ist gegenüber anderen Effekten. Die nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien bezieht sich auf das Quellen des Betons. Hier kann es durch ein weniger wahrscheinliches, nicht auslegungskonformes Verhalten zu einem vorzeitigen Versagen dieses Dichtelements kommen. Der Einfluss der thermischen Expansion oder Kontraktion, der vom Wärmeeintrag der Abfälle herrührt, ist im Bereich der Streckenverschlüsse nicht zu vernachlässigen. Eine Kontraktion aufgrund von Eiszeiten kann erst nach 50.000 Jahren auftreten und wird daher nicht weiter betrachtet.

### 2.3.2.3 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Die Alteration der Streckenverschlüsse wird bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt, so dass sie bei den wahrscheinlichen Entwicklungen nicht zu einem vorzeitigen Ausfall der Streckenverschlüsse führen kann. Falls die Alteration zu einem vorzeitigen Versagen führt, muss mindestens eines der in der folgenden Tabelle angegebenen FEP eine weniger wahrscheinliche Ausprägung haben.

**Tab. 2.18** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*

(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses)

<b>Beeinflussende FEP</b>	Kanalisation in Dichtelementen*
Verschlußmaterial	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Schachtverschlüsse	Auflösung und Ausfällung
Streckenverschlüsse*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Auflockerungszone*
Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses*	Advektion
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	Diffusion

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die Eigenschaften des Verschlussmaterials bestimmen die Alteration. Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen sowie die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen beeinflussen direkt die Alteration der Verschlüsse. Das

geochemische Milieu im Grubengebäude bestimmt unter Einfluss von Advektion und Diffusion die Prozesse, die zur (chemischen) Alteration der Verschlüsse führen, z. B. über die Auflösung und Ausfällung.

#### 2.3.2.4 Fluiddruck

Unter extremen Bedingungen, z. B. bei Druckgradienten über den Streckenverschluss, die größer sind als nach Auslegung zugelassen, kann der Fluiddruck das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses beeinflussen. Da der Fluiddruck aber eine berechnete, zeitabhängige Größe ist, kann im Rahmen der Szenarientwicklung keine Ausprägung angegeben werden.

**Tab. 2.19** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*  
(hier bezüglich vorzeitigem Versagen eines Streckenverschlusses)

Beeinflussende FEP	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
Bohrlochverrohrung	Quellen des Bentonits*
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Wärmeproduktion
Konvergenz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt, bezieht sich aber auch nur auf Schachtverschlüsse

#### 2.3.2.5 Auflockerungszone

Eine Auflockerungszone um den Streckenverschluss hat Einfluss auf die integrale Permeabilität des Verschlusses, die sich aus der Permeabilität des Bauwerks (inklusive Kontaktzone) und derjenigen der Auflockerungszone zusammensetzt, sowie auf den Transport von Reaktanden, z. B. bei der Alteration der Streckenverschlüsse. Eine Auflockerungszone wird von den in der folgenden Tabelle aufgeführten FEP beeinflusst. Eine entsprechend erhöhte hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone kann zum vorzeitigen Versagen eines Streckenverschlusses beitragen.

**Tab. 2.20** Beeinflussende FEP für das FEP *Auflockerungszone*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses)

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Inventar: Sonstige Stoffe	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial	Konvergenz
Schachtverschlüsse	Salzgruskompaktion
Streckenverschlüsse*	Quellen des Bentonits*
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Sonstige Verschlussbauwerke	Wirtsgestein
Bohrlochverrohrung	Spannungsänderung und Spannungumlagerung*

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die mechanischen Eigenschaften des Verschlussmaterials charakterisieren den Verschluss und beeinflussen die Auflockerungszone um dieses Material. Die Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen die Entstehung und Art der Auflockerungszone. Über thermische Expansion oder Kontraktion als Folge der Wärmeeffekte der eingelaagerten Abfälle können Auflockerungszonen entstehen oder beeinflusst werden. Durch die Konvergenz des umgebenden Gebirges wird eine Auflockerungszone mit der Zeit geschlossen.

### 2.3.2.6 Spannungsänderung und Spannungumlagerung

Die Streckenverschlüsse werden von Spannungsänderungen und Spannungumlagerungen beeinflusst. Bei entsprechender Ausprägung kann es dabei zu einem vorzeitigen Versagen eines Streckenverschlusses kommen. In der folgenden Tabelle sind die FEP zusammengestellt, die die Spannungsänderungen und Spannungumlagerungen auslösen bzw. beeinflussen.

Die Auswirkungen eines Erdbebens und des sehr langsam ablaufenden Diapirismus werden bereits auf der 1. Ebene behandelt und daher hier nicht weiter diskutiert. Die Auswirkungen der Sedimentation sowie der Transgression oder Regression auf das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses sind während der Funktionsdauer des Streckenverschlusses gering. Die FEP, die in Zusammenhang mit Kaltzeiten stehen, treten erst nach der Funktionsdauer des Streckenverschlusses auf und brauchen daher nicht weiter betrachtet zu werden.

**Tab. 2.21** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*  
(hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses)

<b>Auslösende FEP</b>	
Erdbeben*	Inlandvereisung in randlicher Lage
Sedimentation	Vollständige Inlandvereisung
Diapirismus*	Glaziale Rinnenbildung
Transgression oder Regression	Thermische Expansion oder Kontraktion
<b>Beeinflussende FEP</b>	
Brennelement-Behälter	Fluiddruck*
Sonstige Endlagerbehälter	Salzgruskompektion
Versatz	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Verschlussmaterial	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Schachtverschlüsse	<del>Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses</del>
Streckenverschlüsse*	Lageverschiebung des Schachtverschlusses
Sonstige Verschlussbauwerke	Ausfall eines Dichtpfropfens
Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	Quellen des Bentonits
Bohrlochverrohrung	Wirtsgestein
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Deck- und Nebengebirge
Konvergenz	Thermochemische Sulfatreduktion

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Eine thermische Expansion oder Kontraktion durch den Wärmeeintrag der eingelagerten Abfälle sowie die Konvergenz führen zu Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Bereich der Streckenverschlüsse. Diese Effekte werden durch die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflusst. Die Eigenschaften des Verschlussmaterials beeinflussen Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen innerhalb der Verschlüsse, die auch durch nicht thermisch induzierte Volumenänderungen beeinflusst sind. Die Auswirkungen der thermochemischen Sulfatreduktion sind im Bereich der Schachtverschlüsse gering, da dort nur geringe Temperaturen auftreten.

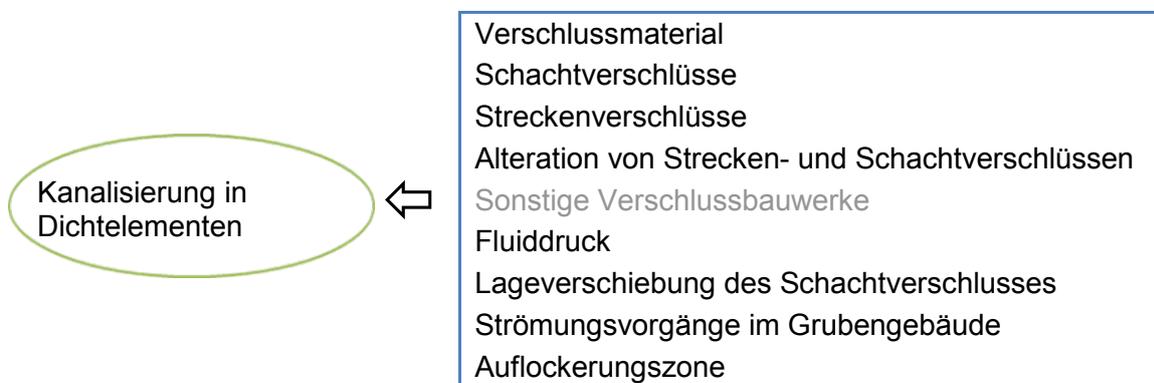
### 2.3.3 Nicht berücksichtigte FEP

Erdbeben: Ein Erdbeben mit der maximalen Intensität, die im Nachweiszeitraum als wahrscheinlich eingestuft ist, wird bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt (Bemessungs-Erdbeben bis zur Stärke 7,3 MSK /WOL 12/). Stärkere Erdbeben brauchen bezüglich des vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses nicht berücksichtigt zu werden.

Kanalisation in Dichtelementen: Die Auswirkungen dieses FEP auf das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses werden in Kapitel 0 behandelt.

## 2.4 Kanalisation in Dichtelementen

Unter Kanalisation wird die Ausbildung von Fließwegen in den Dichtelementen der Schacht- und Streckenverschlüsse verstanden, in denen sich ein strömendes Medium gegenüber seiner Umgebung bevorzugt ausbreiten kann. Auch Kanäle in der Kontaktzone zwischen dem Baukörper und dem umgebenden Gestein werden in diesem FEP berücksichtigt. In der folgenden Abbildung sind die die Kanalisation beeinflussenden FEP dargestellt.



Die Ausprägung bezieht sich auf die Permeabilität der entstehenden Kanäle.

Zu der Ausbildung von Kanälen kann es in einem Baumaterial (inklusive der Kontaktzone) kommen, wenn beim lagenweisen Einbringen des Materials die verschiedenen Lagen nicht vollständig verbunden werden oder wenn es z. B. zu einem ungleichmäßigen Aufsättigen und Quellen von Bentonit kommt /SCH 09/. Die Bildung von Strömungskanälen in geotechnischen Barrieren ist in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht worden /BÖR 06a/, /BÖR 06b/, /TEC 02/, /JOH 06/, /KUD 07/, /PUS 02/, /SIT 03/.

Eine Kanalisierung kann durch Abweichung von als wahrscheinlich angesehenen Bedingungen entstehen. Dies können Abweichungen im Verschlussmaterial oder in den Verschlüssen selbst sein, die die Wahrscheinlichkeit des Entstehens von Kanälen beeinflussen. Durch die Alteration der Verschlüsse, bzw. der Dichtelemente in den Verschlüssen können Kanäle entstehen. Die Kanalbildung wird durch den Fluiddruck und Strömungsvorgänge im Grubengebäude beeinflusst, deren Ausprägung aber erst in Modellrechnungen ermittelt werden kann. Die Lageverschiebung des Schachtverschlusses und die Auflockerungszone beeinflussen die Kontaktzone zwischen dem Dichtbauwerk und dem angrenzenden Gestein und können an dieser Stelle zur Kanalisierung beitragen.

Alle Ausprägungen der Kanalisierung in den Dichtelementen werden von den Ausprägungen repräsentiert, die beim vorzeitigen Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses behandelt werden, siehe Kapitel 2.2 und 2.3. Im Folgenden werden trotzdem als Referenz die beeinflussenden FEP beschrieben.

#### **2.4.1 Auslösende FEP**

Es wurden keine auslösenden FEP identifiziert.

#### **2.4.2 Beeinflussende FEP**

##### **2.4.2.1 Verschlussmaterial**

Das Verschlussmaterial beeinflusst die Kanalisierung in Dichtelementen, denn es bestimmt die Wahrscheinlichkeit der Rissentstehung, die Ausprägung der entstehenden Permeabilitäten, usw. Die Ausprägungen des Verschlussmaterials werden von den in der folgenden Tabelle angegebenen FEP beeinflusst.

**Tab. 2.22** Beeinflussende FEP für das FEP *Verschlussmaterial*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Glaziale Rinnenbildung	Quellen des Bentonits
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflösung und Ausfällung
Konvergenz	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Thermische Expansion oder Kontraktion
<del>Kanalisierung in Dichtelementen</del>	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Alle in der Tabelle angeführten FEP beeinflussen das Verschlussmaterial entweder durch mechanische oder durch chemische Einwirkungen. Die glaziale Rinnenbildung wirkt erst nach der Funktionsdauer der Verschlüsse und ist daher bei der Beschreibung der Verschlussmaterialien für die Zeiten größer als 50.000 Jahre zu berücksichtigen.

#### **2.4.2.2 Schachtverschlüsse**

Dieses FEP beschreibt das Design sowie die physikalischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften der Schachtverschlüsse. Es beeinflusst daher unmittelbar die Kanalisierung in den Dichtelementen des Schachtverschlusses. Die Ausprägungen des FEP *Schachtverschlüsse* werden von den in der folgenden Tabelle angegebenen FEP beeinflusst. Die Auswirkungen des sehr langsam ablaufenden Diapirismus sowie der Subrosion und der glazialen Rinnenbildung auf die Schachtverschlüsse wirken erst nach der Funktionsdauer der Verschlüsse und sind daher bei der Beschreibung der Schachtverschlüsse für die Zeiten größer als 50.000 Jahre zu berücksichtigen. Da bereits bei der Auslegung der Schachtverschlüsse das Bemessungserdbeben berücksichtigt ist und keine größeren Werte für ein Erdbeben zu unterstellen werden, braucht das FEP *Erdbeben* hier nicht weiter betrachtet zu werden.

**Tab. 2.23** Beeinflussende FEP für das FEP *Schachtverschlüsse*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Diapirismus	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Subrosion	Lageverschiebung des Schachtverschlusses*
Glaziale Rinnenbildung	<del>Kanalisierung in Dichtelementen</del>
Verschlußmaterial	Quellen des Bentonits
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Konvergenz	Auflockerungszone*
Fluiddruck*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Das Verschlussmaterial beeinflusst per se die Eigenschaften der Schachtverschlüsse. Das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses bedeutet, dass sich der Schachtverschluss gravierend geändert hat. Die Konvergenz führt zu einer Einspannung der Dichtelemente, aber auch zu einer Kompaktion der Langzeitdichtung im Verschlussbauwerk. Es wird angenommen, dass der Einfluss der Konvergenz auf die Kanalisierung in den Dichtelementen vernachlässigbar klein ist gegenüber anderen Effekten. Die nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien bezieht sich z. B. auf das Verhalten der Betone. Hier und beim Quellen des Bentonits kann es durch ein weniger wahrscheinliches, nicht auslegungskonformes Verhalten zu einer Kanalisierung in den Dichtelementen kommen. Der Einfluss der thermischen Expansion oder Kontraktion, der vom Wärmeeintrag der Abfälle herrührt, ist im Schachtbereich zu berücksichtigen, obwohl das Temperaturfeld selbst den Schachtbereich kaum erreicht. Eine Kontraktion aufgrund von Eiszeiten wirkt erst nach der Funktionsdauer der Verschlüsse und ist daher bei der Beschreibung der Schachtverschlüsse für die Zeiten größer als 50.000 Jahre zu berücksichtigen. Durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen wird der Schachtverschluss mechanisch beeinflusst.

### 2.4.2.3 Streckenverschlüsse

Dieses FEP beschreibt das Design sowie die physikalischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften der Streckenverschlüsse. Es beeinflusst daher unmittelbar die Kanalisierung in diesem Bereich. Die Auswirkungen des sehr langsam ablaufenden Diapirismus auf die Streckenverschlüsse sind erst nach der Funktionsdauer der Verschlüsse relevant und daher bei der Beschreibung der Streckenverschlüsse für die Zeiten größer als 50.000 Jahre zu berücksichtigen. Da bereits bei der Auslegung der Streckenverschlüsse das Bemessungserdbeben berücksichtigt ist und keine größeren Werte für ein Erdbeben zu unterstellen sind, braucht das FEP *Erdbeben* hier nicht weiter betrachtet zu werden.

**Tab. 2.24** Beeinflussende FEP für das FEP *Streckenverschlüsse*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

Beeinflussende FEP	
Erdbeben	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Diapirismus	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
Verschlußmaterial*	<del>Kanalisierung in Dichtelementen</del>
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Konvergenz	Auflockerungszone*
Fluiddruck*	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Das Verschlussmaterial beeinflusst per se die Eigenschaften der Streckenverschlüsse. Das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses bedeutet, dass sich der Streckenverschluss gravierend geändert hat. Die Konvergenz führt zu einer Einspannung der Dichtelemente. Es wird angenommen, dass der Einfluss der Konvergenz auf die Kanalisierung in den Dichtelementen vernachlässigbar klein ist gegenüber anderen Effekten. Die nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien bezieht sich auf das Verhalten des Baustoffs. Hier kann es durch ein weniger wahrscheinliches, nicht auslegungskonformes Verhalten zu einer Kanalisierung in den Dichtelementen kommen. Der Einfluss der thermischen Expansion oder Kontraktion, der vom Wärmeintrag der Abfälle herrührt, ist im Bereich der Streckenverschlüsse nicht zu vernachlässigen. Eine Kontraktion aufgrund von Eiszeiten wirkt erst nach der Funktionsdauer

der Verschlüsse und ist daher bei der Beschreibung der Streckenverschlüsse für die Zeiten größer als 50.000 Jahre zu berücksichtigen. Durch Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen wird der Streckenverschluss mechanisch beeinflusst.

#### 2.4.2.4 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Die Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse wird bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt, so dass sie bei den wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems nicht zu einer relevanten Kanalisierung führen kann. Damit die Alteration zu einer relevanten Kanalisierung führt, muss mindestens eines der in der folgenden Tabelle angegebenen FEP eine weniger wahrscheinliche Ausprägung haben.

**Tab. 2.25** Beeinflussende FEP für das FEP *Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

Beeinflussende FEP	Kanalisierung in Dichtelementen
Verschlussmaterial*	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Schachtverschlüsse*	Auflösung und Ausfällung
Streckenverschlüsse*	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Auflockerungszone*
Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Advektion
Lageverschiebung des Schachtverschlusses*	Diffusion

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen sowie die Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen führen direkt zu einer Alteration der Verschlüsse. Das geochemische Milieu im Grubengebäude sowie die hydrochemischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge bestimmen unter Einfluss von Advektion und Diffusion die Prozesse, die zur (chemischen) Alteration der Verschlüsse führen, z. B. über die Auflösung und Ausfällung. Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien beeinflussen die Alteration, da sie die Eigenschaften der Materialien verändern. Das vorzeitige Versagen eines Strecken- oder Schachtverschlusses sowie die Korrosion

von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen können unmittelbar mit einer Alteration verbunden sein.

#### 2.4.2.5 Fluiddruck

Unter extremen Bedingungen, z. B. bei Druckgradienten über einen Verschluss, die größer sind als nach Auslegung zugelassen, kann der Fluiddruck die Kanalisierung in Dichtelementen beeinflussen. Da der Fluiddruck aber eine berechnete, zeitabhängige Größe ist, kann im Rahmen der Szenarienentwicklung keine Ausprägung angegeben werden.

**Tab. 2.26** Beeinflussende FEP für das FEP *Fluiddruck*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

Beeinflussende FEP	Strömungsvorgänge im Grubengebäude*
Bohrlochverrohrung	Quellen des Bentonits
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Wärmeproduktion
Konvergenz	Thermische Expansion oder Kontraktion
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gasmenge im Grubenbau
Lösungen im Grubenbau	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

#### 2.4.2.6 Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Durch eine Lageverschiebung ist es möglich, dass sich in einem Schachtverschluss Kanäle in Dichtelementen ausbilden, bevorzugt in der Kontaktzone zwischen dem Dichtbauwerk und dem angrenzenden Gestein. Die in der folgenden Tabelle angegebenen FEP lösen eine Lageverschiebung aus oder beeinflussen sie.

Die Auswirkungen des sehr langsam ablaufenden Diapirismus auf eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses sind erst nach der Funktionsdauer der Verschlüsse relevant und daher bei der Beschreibung der Streckenverschlüsse für die Zeiten größer als 50.000 Jahre zu berücksichtigen. Da bereits bei der Auslegung der Schachtverschlüsse das Bemessungserdbeben berücksichtigt ist und keine größeren Werte für

ein Erdbeben zu unterstellen sind, braucht das FEP *Erdbeben* nicht weiter betrachtet zu werden.

**Tab. 2.27** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

<b>Auslösende FEP</b>	
Diapirismus	Thermische Expansion oder Kontraktion
<b>Beeinflussende FEP</b>	Fluiddruck*
Erdbeben	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
Verschlussmaterial*	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
Schachtverschlüsse*	Quellen des Bentonits
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Auflösung und Ausfällung
Konvergenz	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die thermische Expansion oder Kontraktion des Gebirges infolge des Wärmeeintrags der eingelagerten Abfälle kann eine Lageverschiebung auslösen. Die mechanischen Eigenschaften des Verschlussmaterials, insbesondere der Widerlager und der Schottersäulen, beeinflussen eine Lageverschiebung. Die nicht thermisch induzierten Volumenänderungen, die Konvergenz sowie das Quellen des Bentonits führen zu einer Einspannung der Dichtelemente im Gebirge. Bei Überschreiten der Kenngrößen kann jedoch eine Lageverschiebung beeinflusst werden. Das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses sowie Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen können eine Lageverschiebung beeinflussen.

#### 2.4.2.7 Strömungsvorgänge im Grubengebäude

Durch die Strömungsvorgänge im Grubengebäude werden Stoffe mit der Lösung zu den Verschlüssen transportiert bzw. von diesen wegtransportiert. In der folgenden Tabelle sind die die Strömungsvorgänge auslösenden und beeinflussenden FEP zusammengestellt. In den wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems wird angenommen, dass diese Strömungsvorgänge von geringem Einfluss auf die Kanalisierung

sind. In den weniger wahrscheinlichen Entwicklungen können sie aber zu stärkerer Kanalisierung führen.

**Tab. 2.28** Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP *Strömungsvorgänge im Grubengebäude*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

Auslösende FEP	
Konvergenz	Lösungszutritt ins Grubengebäude
<b>Beeinflussende FEP</b>	Porosität
Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	Permeabilität
Ausfall einer Bohrlochverrohrung	Lösungen im Grubenbau
Fluiddruck*	Geochemisches Milieu im Grubenbau
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Thermische Expansion oder Kontraktion
Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses	Gasmenge im Grubenbau
Ausfall eines Dichtpfropfens	Gaseindringdruck

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Durch Konvergenz des Gebirges und den Lösungszutritt ins Grubengebäude werden die Strömungsvorgänge von Lösungen und Gasen ausgelöst. In Abhängigkeit von der Porosität und Permeabilität können Lösungen die Grubenbaue, also auch die Verschlüsse erreichen. Die Strömungsvorgänge werden vom vorzeitigen Versagen eines Streckenverschlusses und indirekt vom vorzeitigen Versagen eines Schachtverschlusses (über den Lösungszutritt ins Grubengebäude) beeinflusst. Auch die nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien sowie die thermische Expansion und Kontraktion beeinflussen über die Materialeigenschaften die Strömungsvorgänge. Die Gasmenge im Grubenbau und der Gaseindringdruck beeinflussen die Strömung der Gase und der Lösungen über Lösungsverdrängung und Zweiphasen-Effekte. Das geochemische Milieu ist von untergeordneter Bedeutung für die Strömungsvorgänge.

#### **2.4.2.8 Auflockerungszone**

Eine Auflockerungszone um einen Verschluss bzw. ein Dichtelement hat Einfluss auf dessen integrale Permeabilität, d. h., die Permeabilität, die sich aus der Kombination über den Verschluss und die Auflockerungszone bildet, sowie auf den Transport von

Reaktanden, z. B. bei der Alteration der Schacht- oder Streckenverschlüsse. Eine Auflockerungszone wird von den in der folgenden Tabelle aufgeführten FEP beeinflusst. Eine entsprechende Ausprägung der Auflockerungszone kann durch Wechselwirkungen mit der Kontaktzone zwischen dem Dichtbauwerk und dem angrenzenden Gestein zu einer Kanalisierung in den Dichtelementen beitragen.

**Tab. 2.29** Beeinflussende FEP für das FEP *Auflockerungszone*  
(hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen)

<b>Beeinflussende FEP</b>	
Inventar: Sonstige Stoffe	Ausfall einer Bohrlochverrohrung
Verschlussmaterial*	Konvergenz
Schachtverschlüsse*	Salzgruskompaktion
Streckenverschlüsse*	Quellen des Bentonits
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen*	Thermische Expansion oder Kontraktion
Sonstige Verschlussbauwerke	Wirtsgestein
Bohrlochverrohrung	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

\*dieses FEP wird bereits auf der 1. Ebene behandelt

Die mechanischen Eigenschaften des Verschlussmaterials charakterisieren den Verschluss und beeinflussen die Auflockerungszone um dieses Material. Die Eigenschaften des Wirtsgesteins beeinflussen die Entstehung und Art der Auflockerungszone. Über thermische Expansion oder Kontraktion als Folge des Wärmeeintrags der eingelagerten Abfälle können Auflockerungszonen entstehen oder beeinflusst werden. Durch das Quellen des Bentonits und Konvergenz des umgebenden Gebirges kann eine Auflockerungszone über die Zeit geschlossen werden. Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge können zur Entstehung von Auflockerungszonen beitragen, sie aber auch wieder verschließen.

### 2.4.3 Nicht berücksichtigte FEP

Das FEP *Sonstige Verschlussbauwerke* braucht nicht weiter betrachtet zu werden, weil es keine direkten Auswirkungen auf die Kanalisierung in einer Initial-Barriere hat.

## Literaturverzeichnis

- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, 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.
- /BÖR 06a/ Börgesson, L., Herneling, J.: Consequences of Loss or Missing Bentonite in a Deposition Hole. SKB Technical Report TR-06-13, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Stockholm, 2006.
- /BÖR 06b/ Börgesson, L., Torbjörn, S.: Piping and Erosion in Buffer and Backfill Materials. SKB Report R-06-80, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Stockholm, 2006.
- /TEC 02/ DBE TECHNOLOGY GmbH: F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth, Hydraulische Modellierungen. Abschlussbericht, 2002.
- /JOH 06/ Johannesson, L.E., Nilsson, U.: Deep Repository – Engineered Barrier Systems, Geotechnical Behaviour of Candidate Backfill Materials, Laboratory Tests and Calculations for determining Performance of the Backfill. SKB Report R-06-73, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Stockholm, 2006.
- /KUD 07/ Kudla, W., Hofmann, M., Gaßner, W., Gruner, M., Glaubach, U.: TDR-Messsystem zur Überwachung von Bentonitabschlussbauwerken; Eignungstests und halbtechnische Versuche. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau: Freiberg, 2007.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /MÜL 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.
- /PUS 02/ Pusch, R.: The Buffer and Backfill Handbook, Part 2: Materials and Techniques. SKB Technical Report TR-02-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Stockholm, Dezember 2001.
- /SCH 09/ Schuhmann, R., Emmerich, K., Kemper, G., Königer, F.: Verschlussystem mit Äquipotenzialsegmenten für die untertägige Entsorgung (UTD und ELA) gefährlicher Abfälle zur Sicherstellung der homogenen Befeuchtung der Dichtelemente und zur Verbesserung der Langzeitstabilität. Schlussbericht, BMBF-Förderkennzeichen: 02C0922, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Competence Center for Material Moisture (CMM): Karlsruhe, 2009.
- /SIT 03/ Sitz, P.: Forschungsvorhaben: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Verschlussbauwerke für UTD im Salinar, Bau und Test eines Verschlussbauwerks unter realen Bedingungen. TU Bergakademie Freiberg: Freiberg, 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.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Die Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen beeinflussende FEP.....	4
Abb. 2.2	Zusammenstellung der FEP, die das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses beeinflussen .....	12

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Weniger wahrscheinliche FEP .....	3
Tab. 2.1	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diapirismus</i> (hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen) .....	6
Tab. 2.2	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Konvergenz</i> (hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen) .....	7
Tab. 2.3	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Metallkorrosion</i> (hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen) .....	8
Tab. 2.4	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen</i> (hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen) .....	9
Tab. 2.5	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Zersetzung von Organika</i> (hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen) .....	9
Tab. 2.6	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflockerungszone</i> (hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen) .....	10
Tab. 2.7	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> (hier bezüglich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen) .....	11
Tab. 2.8	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diapirismus</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses) .....	15
Tab. 2.9	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses) .....	16
Tab. 2.10	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses) .....	17

Tab. 2.11	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses).....	18
Tab. 2.12	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lageverschiebung des Schachtverschlusses</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses).....	19
Tab. 2.13	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Quellen des Bentonits</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses).....	20
Tab. 2.14	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflockerungszone</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses).....	21
Tab. 2.15	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Schachtverschlusses).....	22
Tab. 2.16	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Diapirismus</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses ) .....	26
Tab. 2.17	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Streckenverschlüsse</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses ) .....	26
Tab. 2.18	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses).....	27
Tab. 2.19	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses) .....	28
Tab. 2.20	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflockerungszone</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses) .....	29
Tab. 2.21	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Spannungsänderung und Spannungsumlagerung</i> (hier bezüglich vorzeitigen Versagens eines Streckenverschlusses) .....	30

Tab. 2.22	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Verschlussmaterial</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) .....	33
Tab. 2.23	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Schachtverschlüsse</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) .....	34
Tab. 2.24	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Streckenverschlüsse</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) .....	35
Tab. 2.25	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) ..	36
Tab. 2.26	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Fluiddruck</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) .....	37
Tab. 2.27	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Lageverschiebung des Schachtverschlusses</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) .....	38
Tab. 2.28	Auslösende und beeinflussende FEP für das FEP <i>Strömungsvorgänge im Grubengebäude</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) .....	39
Tab. 2.29	Beeinflussende FEP für das FEP <i>Auflockerungszone</i> (hier bezüglich Kanalisierung in Dichtelementen) .....	40



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## **Anhang C**

### **Darstellung der Einfluss nehmenden FEP auf die Initial-FEP**

August 2012

## Initial-FEP

Erdbeben

Diapirismus

Subrosion

Bildung kryogener Klüfte

Glaziale Rinnenbildung

Versagen eines Brennelement-Behälters

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

Fluiddruck

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Quellen des Bentonits

Auflösung und Ausfällung

Metallkorrosion

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Auflockerungszone

Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

Thermochemische Sulfatreduktion

Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein

## Legende



Initial-FEP



auslösende FEP



beeinflussende FEP

**Erdbeben**

**Ebene 1**

*Keine FEPs*

*Keine FEPs*

**Ebene 2**

## Ebene 1

Inlandvereisung in  
randlicher Lage

Wirtsgestein

**Diapirismus**

- Globale klimatische Veränderungen
- Topografie
- Oberflächengewässer

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

## Ebene 2

## Ebene 1

Diapirismus

- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Wirtsgestein

Auflösung und Ausfällung

Lösungen im Grubenbau

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

Wirtsgestein

Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Deck- und Nebengebirge

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

## Ebene 2

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Wärmeproduktion
- Verdampfen von Wasser
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
- Komplexbildung

- Globale klimatische Veränderungen
- Transgression oder Regression
- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
- Permeabilität
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Wärmeproduktion
- Deck- und Nebengebirge
- Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge
- Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
- Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
- Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges
- Topografie
- Oberflächengewässer

- Erosion
- Sedimentation
- Diagenese
- Subrosion
- Transgression oder Regression
- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Auflösung und Ausfällung
- Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
- Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
- Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge
- Oberflächengewässer
- Komplexbildung

Subrosion

**Bildung  
kryogener  
Klüfte**

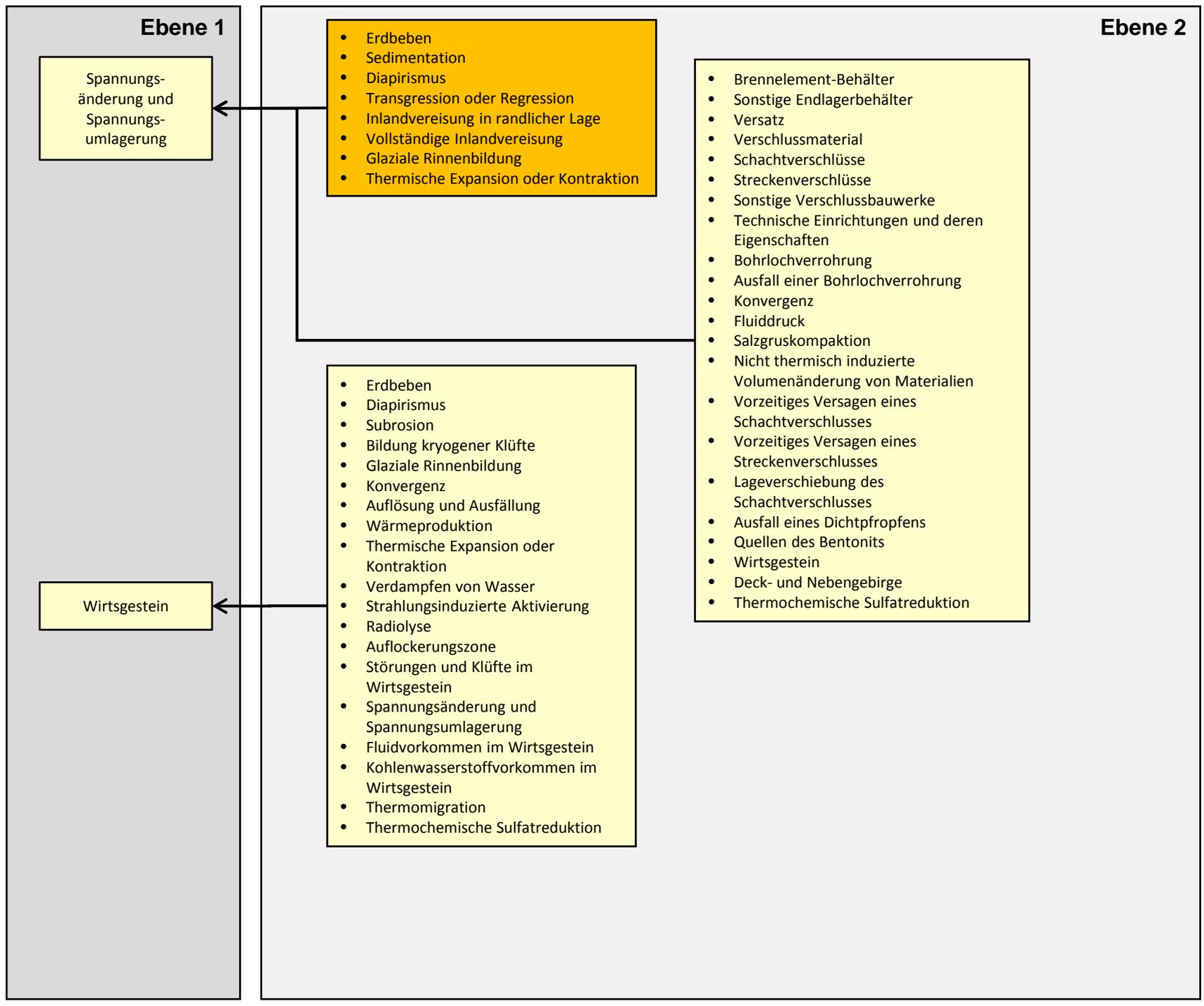
Spannungs-  
änderung und  
Spannungs-  
umlagerung

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

Wirtsgestein



## Ebene 1

Erosion

Vollständige  
Inlandvereisung

Wirtsgestein

Deck- und  
Nebengebirge

**Glaziale  
Rinnenbildung**

- Transgression oder Regression
- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung

- Globale klimatische Veränderungen
- Topografie
- Oberflächengewässer

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Deck- und Nebengebirge
- Topografie
- Oberflächengewässer

- Erosion
- Sedimentation
- Diagenese
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Auflösung und Ausfällung
- Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

## Ebene 2

## Ebene 1

Brennelement-  
Behälter

Ausfall einer  
Bohrlochverrohrung

Metallkorrosion

Material-  
versprödung durch  
Wasserstoff-  
aufnahme

Spannungsänderung  
und Spannungs-  
umlagerung

- Inventar: Metalle
- Versagen eines Brennelement-Behälters
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Salzgruskompektion
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Zersetzung von Organika
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Inventar: Metalle
- Abfallmatrix
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versagen eines Brennelement-Behälters
- Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Diffusion

- Inventar: Metalle
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Bohrlochverrohrung
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Gasmenge im Grubenbau

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

## Ebene 2

- Diapirismus
- Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompektion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

**Versagen  
eines  
Brennelement-  
Behälters**

## Ebene 1

## Ebene 2

### Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (1 von 3)

Verschlussmaterial

- Glaziale Rinnenbildung
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Quellen des Bentonits
- Auflösung und Ausfällung
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

Schachtverschlüsse

- Erdbeben
- Diapirismus
- Verschlussmaterial
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

Streckenverschlüsse

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien

- Salzgruskompaktion
- Quellen des Bentonits
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Glas

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

- Erdbeben
- Diapirismus
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Fluiddruck
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Quellen des Bentonits
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Glaziale Rinnenbildung
- Verschlussmaterial
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Quellen des Bentonits
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Konvergenz
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Erdbeben
- Diapirismus
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Fluiddruck
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

## Ebene 1

## Ebene 2

### Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2 von 3)

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

Kanalisation in Dichtelementen

Geochemisches Milieu im Grubenbau

Auflösung und Ausfällung

Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen

- Diapirismus
- Thermische Expansion oder Kontraktion

- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Fluiddruck
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Auflockerungszone

#### Lösungen im Grubenbau

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Wärmeproduktion
- Verdampfen von Wasser
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
- Komplexbildung

- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Abfallmatrix
- Sonstige Endlagerbehälter
- Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
- Verschlussmaterial
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Radiolyse
- Diffusion

- Erdbeben
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Quellen des Bentonits
- Auflösung und Ausfällung
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Inventar: Metalle
- Inventar: Organika
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Glas
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
- Zersetzung von Organika
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Radiolyse
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermochemische Sulfatreduktion
- Komplexbildung
- Advektion
- Diffusion

## Ebene 1

Auflockerungszone

Hydrochemische  
Verhältnisse im  
Deck- und  
Nebengebirge

Advektion

Diffusion

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Quellen des Bentonits
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

Deck- und Nebengebirge

- Erosion
- Sedimentation
- Diagenese
- Subrosion
- Transgression oder Regression
- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Auflösung und Ausfällung
- Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
- Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
- Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge
- Oberflächengewässer
- Komplexbildung

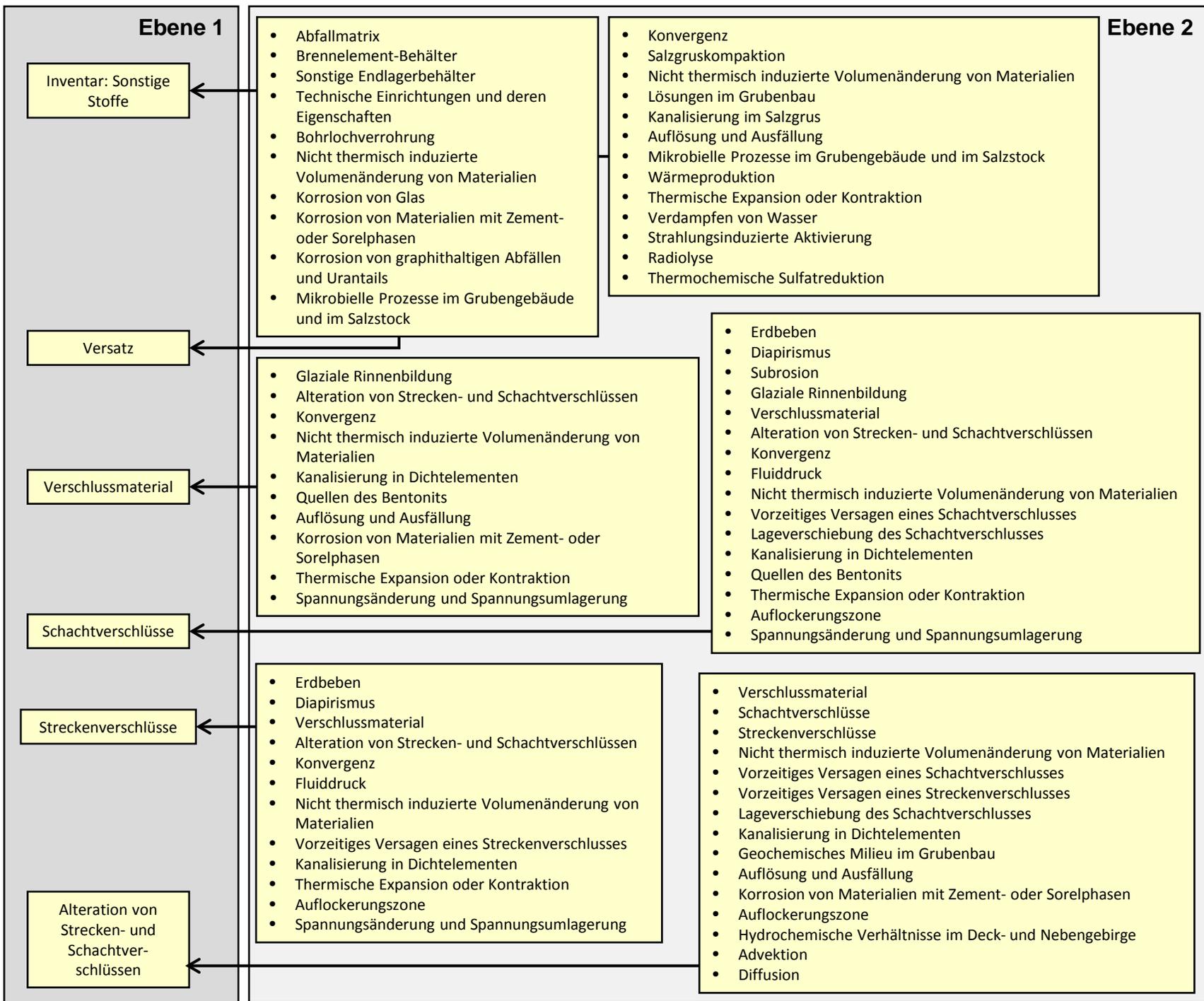
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
- Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

- Porosität
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
- Gasströmung im Deck- und Nebengebirge

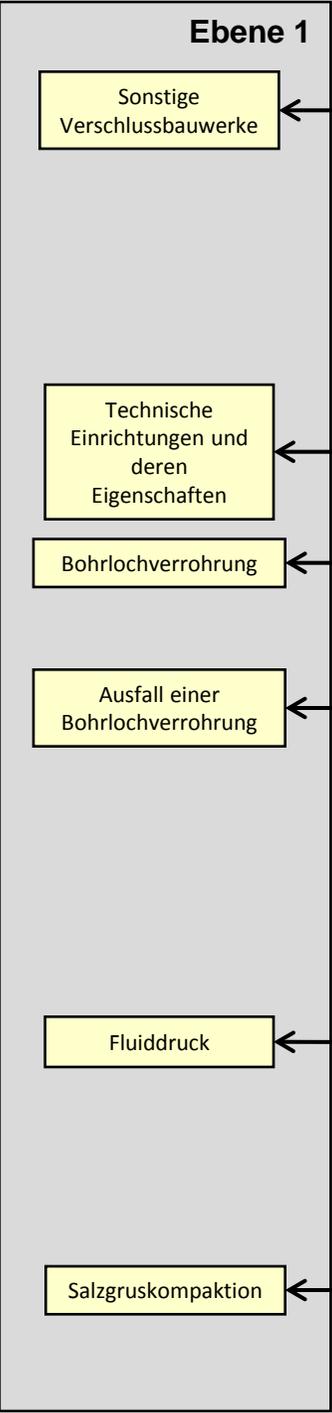
## Ebene 2

**Alteration von  
Strecken- und  
Schachtver-  
schlüssen**  
(3 von 3)

**Konvergenz**  
(1 von 3)



**Konvergenz**  
(2 von 3)



- Erdbeben
- Diapirismus
- Verschlussmaterial
- Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Diapirismus
- Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Quellen des Bentonits
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

- Ebene 2**
- Diapirismus
  - Inventar: Metalle
  - Inventar: Organika
  - Inventar: Sonstige Stoffe
  - Konvergenz
  - Salzgruskompaktion
  - Metallkorrosion
  - Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
  - Zersetzung von Organika
  - Thermische Expansion oder Kontraktion
  - Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Erdbeben
- Diapirismus
- Inventar: Metalle
- Versatz
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Lösungen im Grubenbau
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

## Ebene 1

## Ebene 2

### Konvergenz

(3 von 3)

Lageverschiebung  
des  
Schachtverschlusses

Wirtsgestein

Spannungsänderung  
und  
Spannungsumlagerung

- Diapirismus
- Thermische Expansion oder Kontraktion

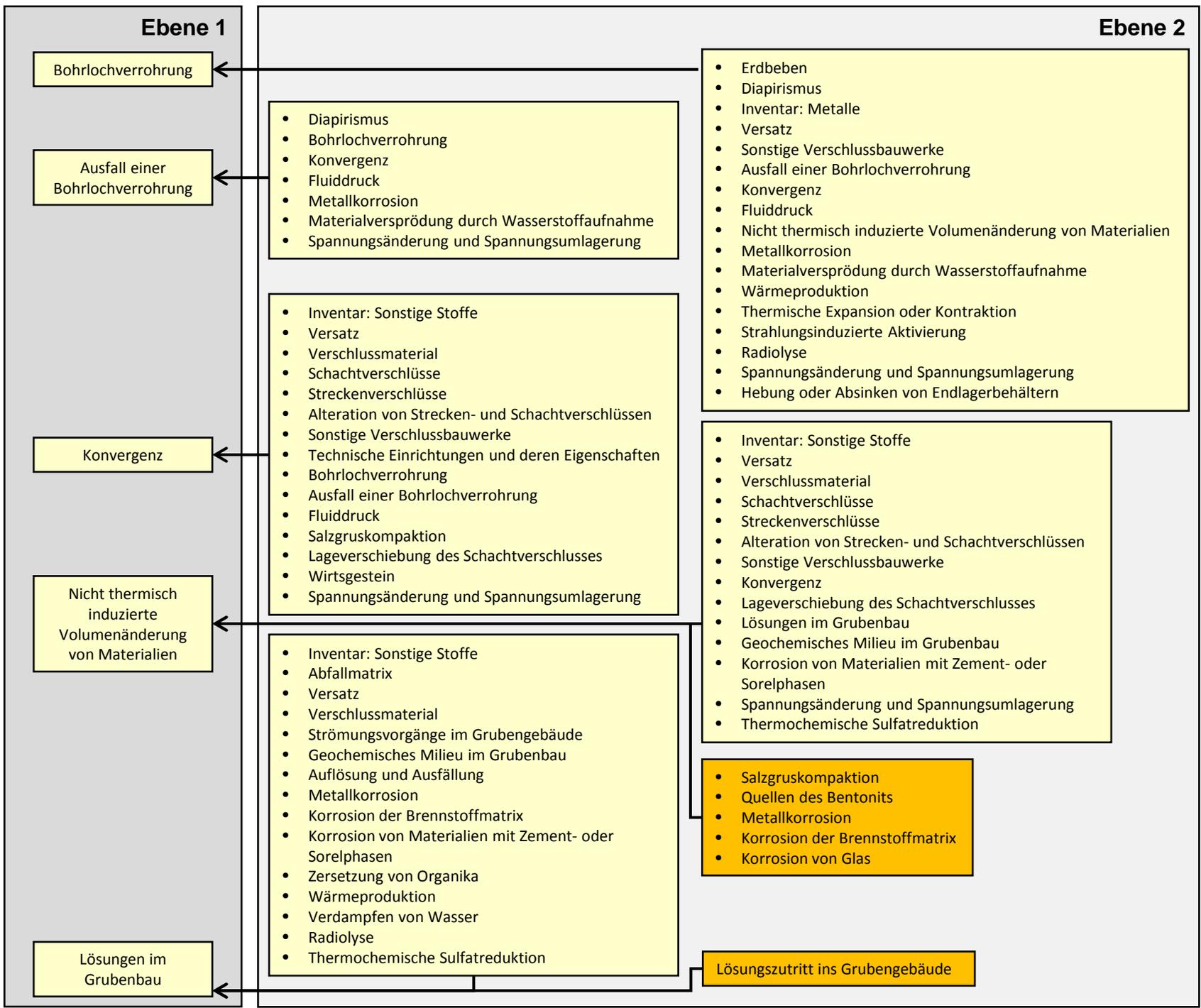
- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

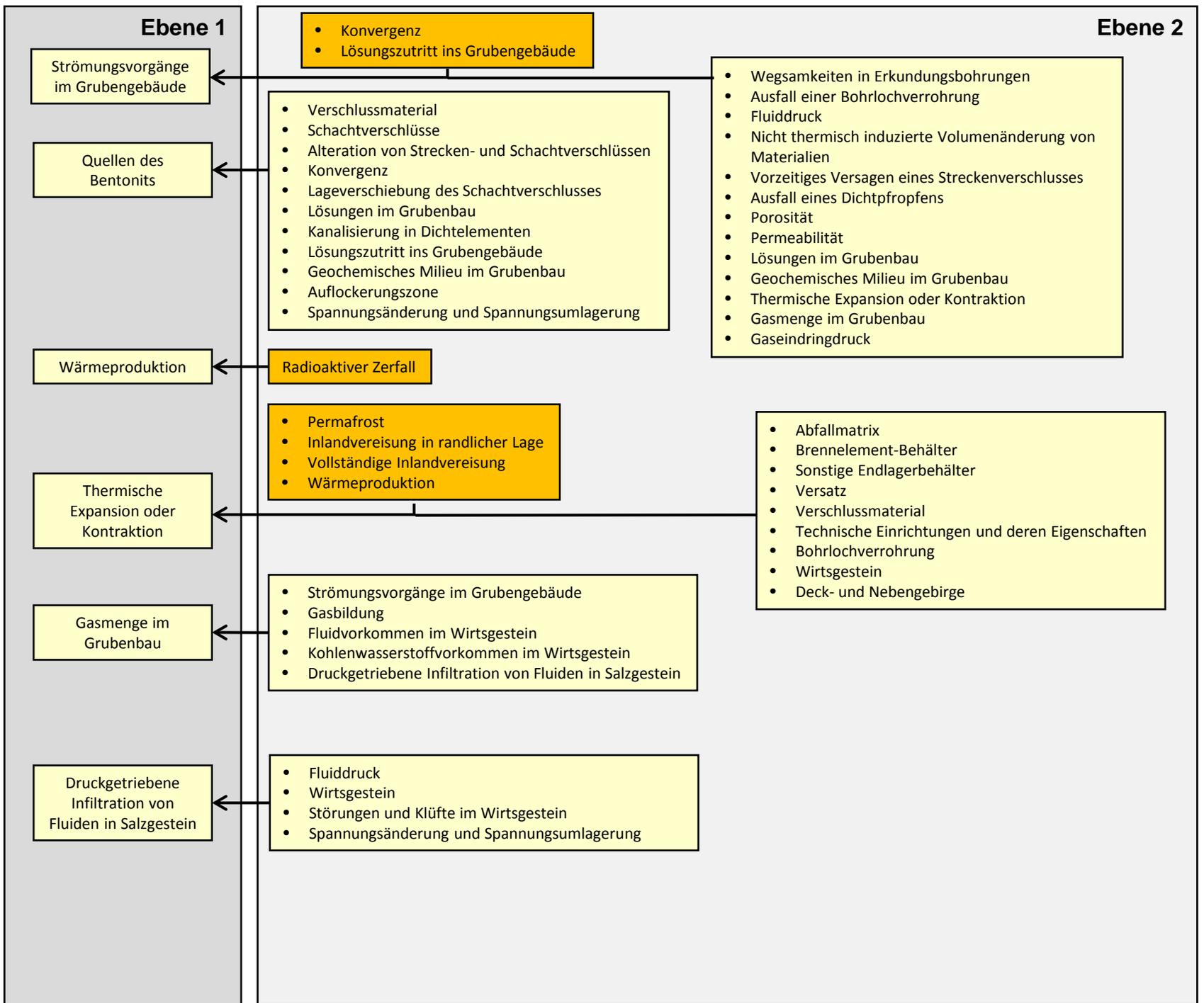
- Erdbeben
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Quellen des Bentonits
- Auflösung und Ausfällung
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

**Fluiddruck**  
(1 von 2)



**Fluiddruck**  
(2 von 2)



## Ebene 1

## Ebene 2

Salzgruskompaktion

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Lösungen im Grubenbau
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Lösungen im Grubenbau
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Lösungszutritt ins Grubengebäude
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

Quellen des Bentonits

- Inventar: Metalle
- Abfallmatrix
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versagen eines Brennelement-Behälters
- Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Diffusion

- Abfallmatrix
- Versagen eines Brennelement-Behälters
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Radiolyse
- Diffusion

Metallkorrosion

Korrosion der Brennstoffmatrix

Korrosion von Glas

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Abfallmatrix
- Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Diffusion

- Konvergenz
- Salzgruskompaktion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Kanalisierung im Salzgrus
- Auflösung und Ausfällung
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Thermochemische Sulfatreduktion

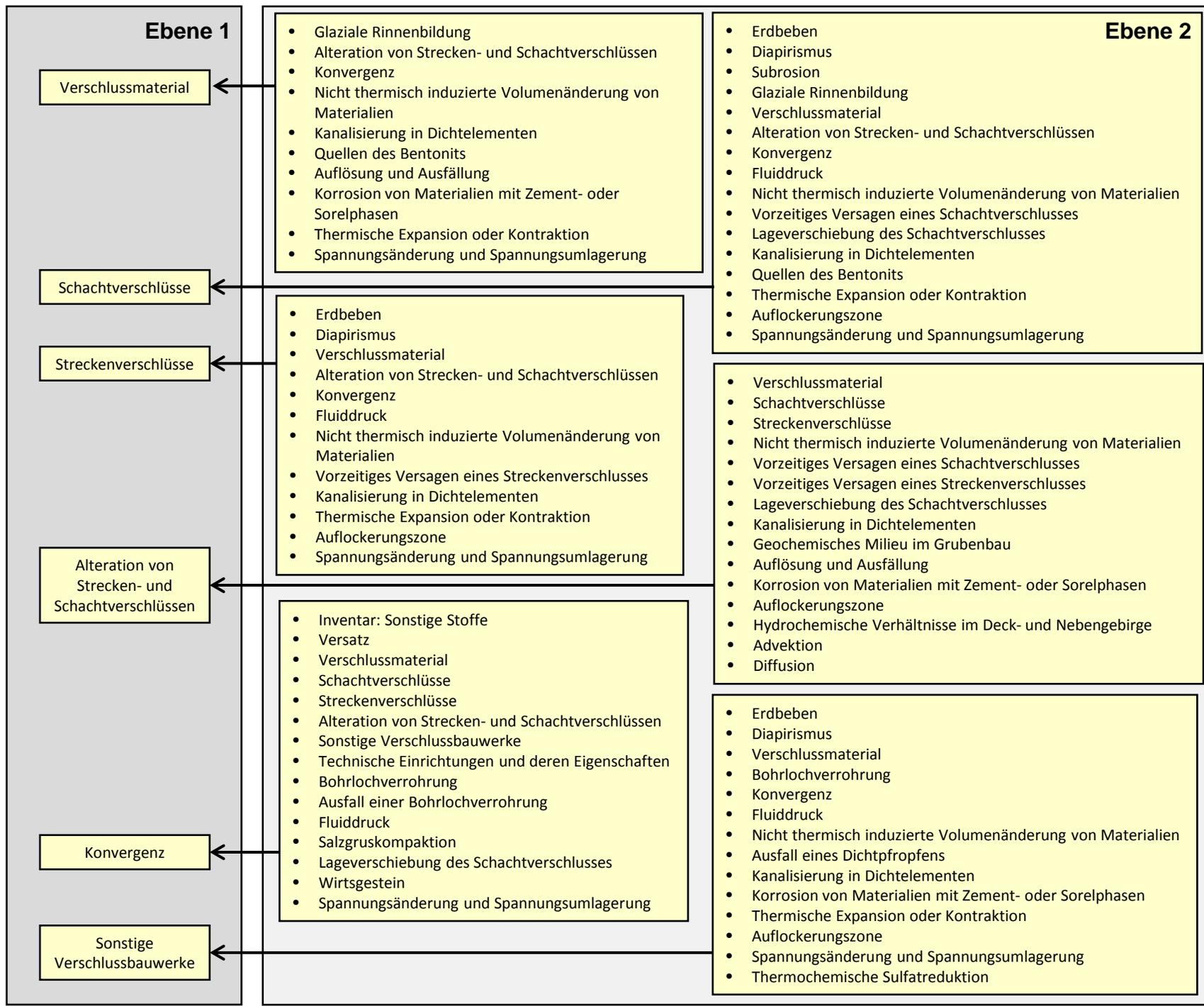
Inventar: Sonstige Stoffe

- Abfallmatrix
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Korrosion von Glas
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Versatz

**Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (1 von 4)**

**Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2 von 4)**



## Ebene 1

## Ebene 2

**Nicht  
thermisch  
induzierte  
Volumen-  
änderung von  
Materialien  
(3 von 4)**

Lageverschiebung  
des  
Schachtverschlusses

- Diapirismus
- Thermische Expansion oder Kontraktion

- Erdbeben
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Quellen des Bentonits
- Auflösung und Ausfällung
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

Lösungen im  
Grubenbau

Lösungszutritt ins Grubengebäude

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Abfallmatrix
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Zersetzung von Organika
- Wärmeproduktion
- Verdampfen von Wasser
- Radiolyse
- Thermochemische Sulfatreduktion

Geochemisches  
Milieu im  
Grubenbau

- Inventar: Metalle
- Inventar: Organika
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Glas
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
- Zersetzung von Organika
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Radiolyse
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermochemische Sulfatreduktion
- Komplexbildung
- Advektion
- Diffusion

Korrosion von  
Materialien mit  
Zement- oder  
Sorelphasen

- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Abfallmatrix
- Sonstige Endlagerbehälter
- Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
- Verschlussmaterial
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Radiolyse
- Diffusion

## Ebene 1

Spannungsänderung  
und  
Spannungsumlagerung

Thermochemische  
Sulfatreduktion

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

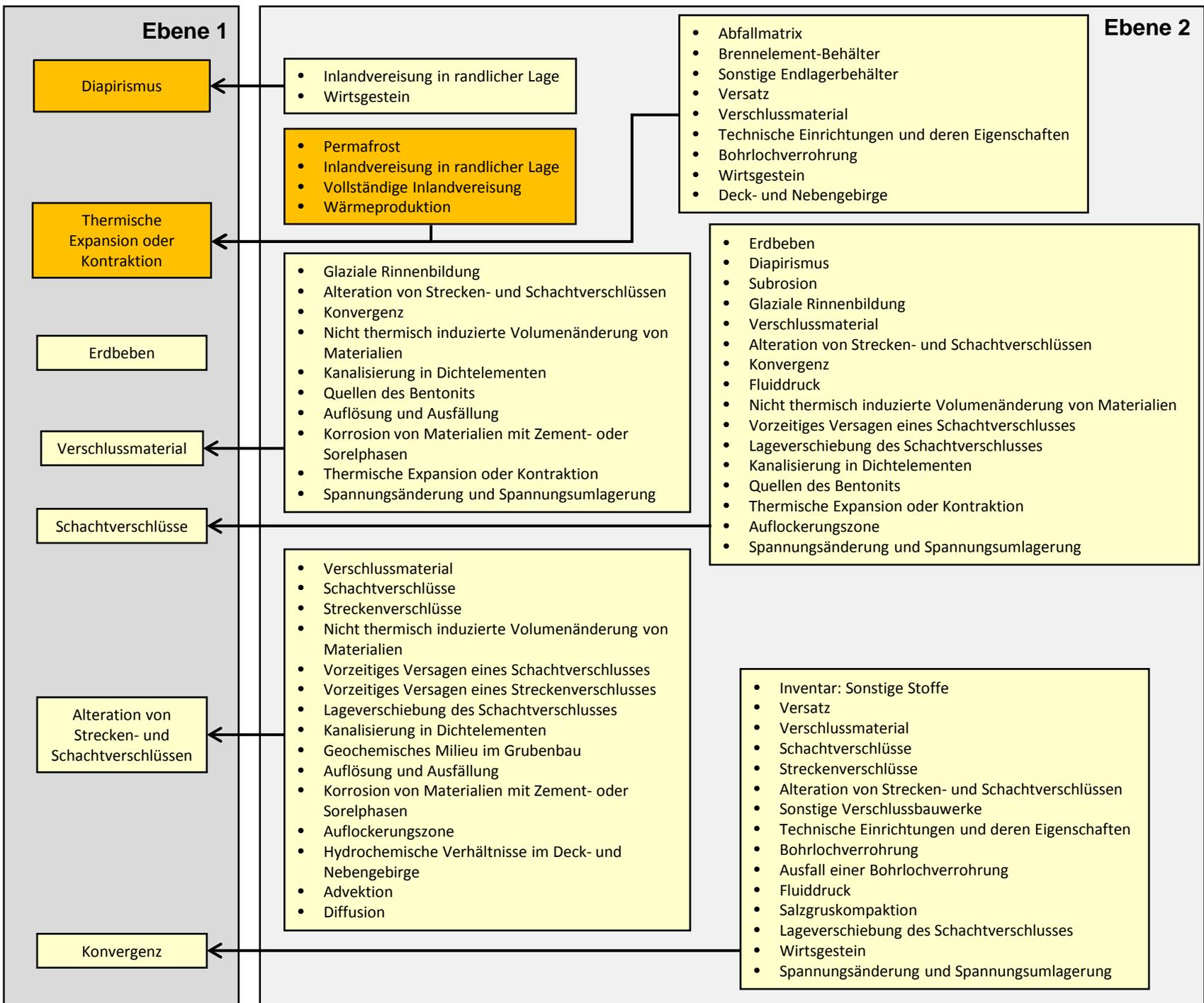
- Versatz
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Wirtsgestein
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

## Ebene 2

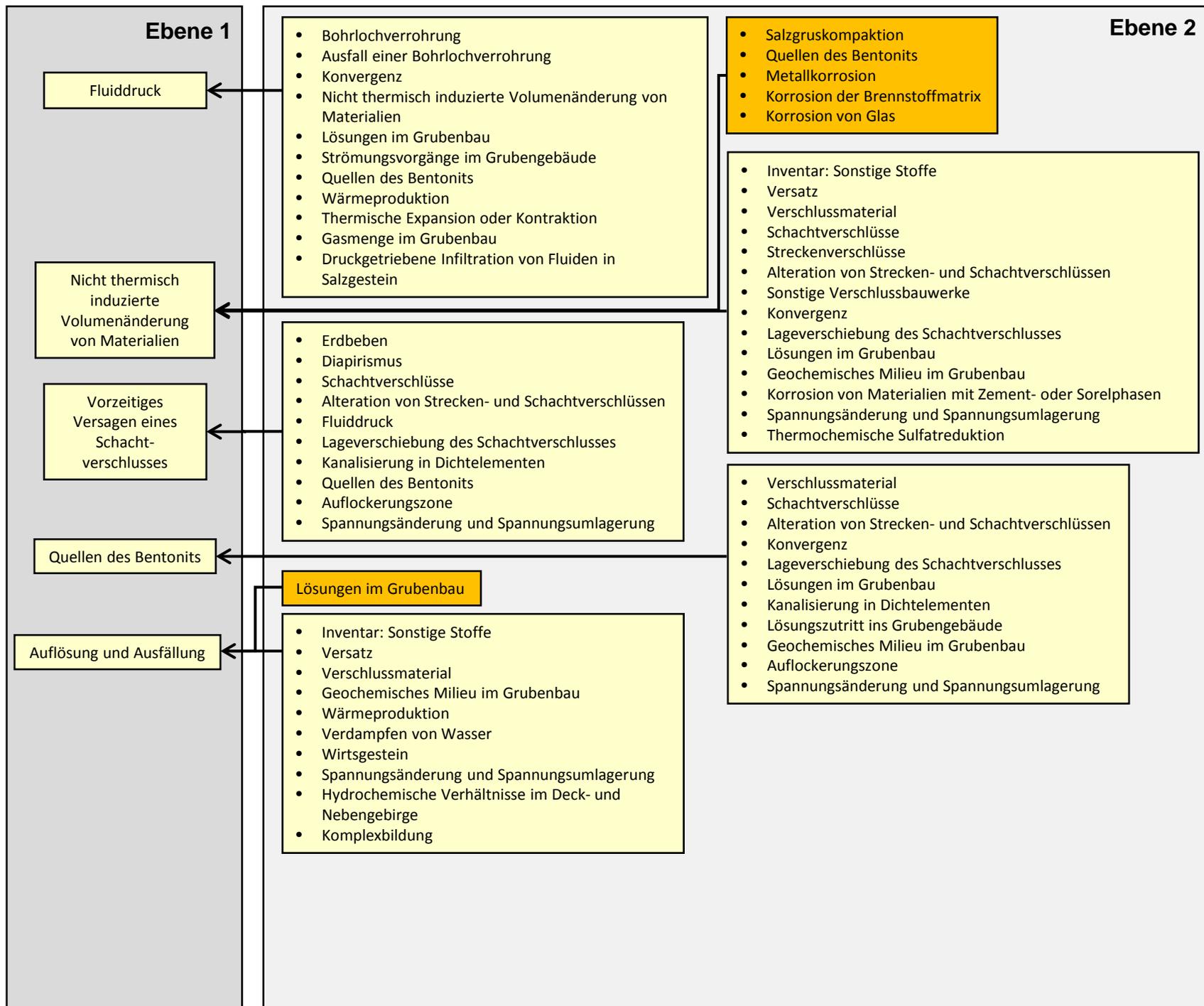
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompektion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

**Nicht  
thermisch  
induzierte  
Volumen-  
änderung von  
Materialien  
(4 von 4)**

**Lageverschiebung des Schachtverschlusses**  
(1 von 3)



**Lageverschiebung des Schachtverschlusses**  
(2 von 3)



**Lageverschiebung des Schachtverschlusses**  
(3 von 3)

Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

**Quellen des Bentonits**  
(1 von 3)

**Ebene 1**

Verschlussmaterial

- Glaziale Rinnenbildung
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Quellen des Bentonits
- Auflösung und Ausfällung
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Schachtverschlüsse

- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Auflockerungszone
- Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
- Advektion
- Diffusion

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen

Konvergenz

**Ebene 2**

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Glaziale Rinnenbildung
- Verschlussmaterial
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Quellen des Bentonits
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

## Ebene 1

## Ebene 2

### Quellen des Bentonits (2 von 3)

Lageverschiebung des Schachtverschlusses

- Diapirismus
- Thermische Expansion oder Kontraktion

- Erdbeben
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Quellen des Bentonits
- Auflösung und Ausfällung
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Kanalisation in Dichteelementen

- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Fluiddruck
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Auflockerungszone

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Lösungen im Grubenbau

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Abfallmatrix
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Zersetzung von Organika
- Wärmeproduktion
- Verdampfen von Wasser
- Radiolyse
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
- Fluiddruck
- Porosität
- Permeabilität
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration

Lösungszutritt ins Grubengebäude

Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

## Ebene 1

Auflockerungszone

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Quellen des Bentonits
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Geochemisches  
Milieu im  
Grubenbau

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

Spannungsänderung  
und  
Spannungsumlagerung

## Ebene 2

- Inventar: Metalle
- Inventar: Organika
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Glas
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
- Zersetzung von Organika
- Mikrobielle Prozesse im Grubenbau und im Salzstock
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Radiolyse
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermochemische Sulfatreduktion
- Komplexbildung
- Advektion
- Diffusion

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

**Quellen des  
Bentonits**  
(3 von 3)

## Ebene 1

## Ebene 2

### Auflösung und Ausfällung (1 von 2)

Lösungen im Grubenbau

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Abfallmatrix
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Zersetzung von Organika
- Wärmeproduktion
- Verdampfen von Wasser
- Radiolyse
- Thermochemische Sulfatreduktion

Lösungszutritt ins Grubengebäude

- Abfallmatrix
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Korrosion von Glas
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock

Inventar: Sonstige Stoffe

Versatz

- Konvergenz
- Salzgruskompaktion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Kanalisierung im Salzgrus
- Auflösung und Ausfällung
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Glaziale Rinnenbildung
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Quellen des Bentonits
- Auflösung und Ausfällung
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

Verschlussmaterial

Wärmeproduktion

Radioaktiver Zerfall

Verdampfen von Wasser

- Fluiddruck
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Wärmeproduktion

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

Wirtsgestein

**Auflösung und Ausfällung**  
(2 von 2)

Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompektion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

**Deck- und Nebengebirge**

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

- Erosion
- Sedimentation
- Diagenese
- Subrosion
- Transgression oder Regression
- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Auflösung und Ausfällung
- Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
- Gasströmung im Deck- und Nebengebirge
- Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge
- Oberflächengewässer
- Komplexbildung

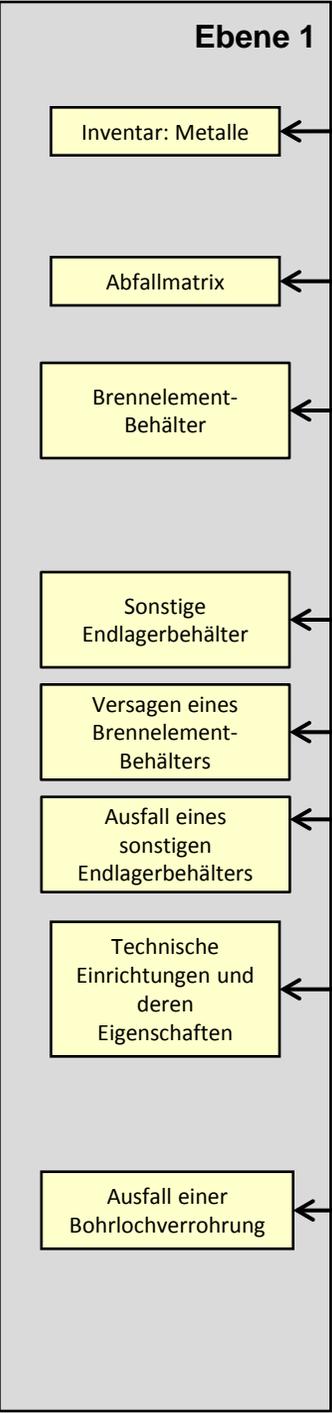
- Inventar: Metalle
- Inventar: Organika
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Glas
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
- Zersetzung von Organika
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Radiolyse
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermochemische Sulfatreduktion
- Komplexbildung
- Advektion
- Diffusion

Geochemisches Milieu im Grubenbau

- Inventar: Organika
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Zersetzung von Organika
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
- Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion
- Radionuklidtransport in der flüssigen Phase

Komplexbildung

**Metallkorrosion**  
(1 von 2)



- Abfallmatrix
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Strahlungsinduzierte Aktivierung

- Inventar: Metalle
- Versagen eines Brennelement-Behälters
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Salzgruskompaktion
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Zersetzung von Organika
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Brennelement-Behälter
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Diapirismus
- Inventar: Metalle
- Inventar: Organika
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Konvergenz
- Salzgruskompaktion
- Metallkorrosion
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Zersetzung von Organika
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

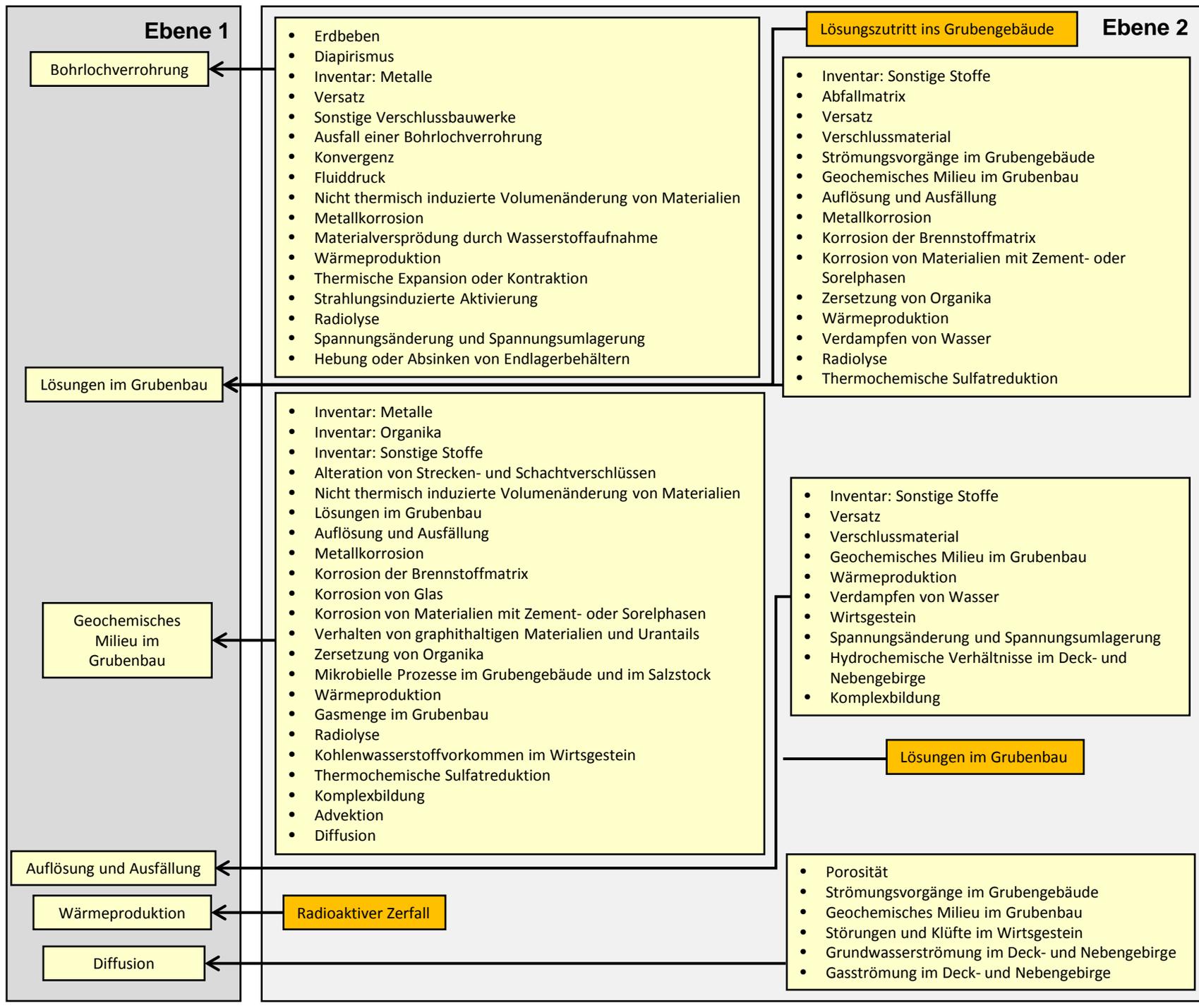
- Ebene 2**
- Inventar: Metalle
  - Metallkorrosion
  - Korrosion der Brennstoffmatrix
  - Korrosion von Glas
  - Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
  - Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
  - Zersetzung von Organika
  - Thermische Expansion oder Kontraktion
  - Strahlungsinduzierte Aktivierung
  - Radiolyse
  - Radioaktiver Zerfall

- Inventar: Metalle
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Salzgruskompaktion
- Metallkorrosion
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Zersetzung von Organika
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

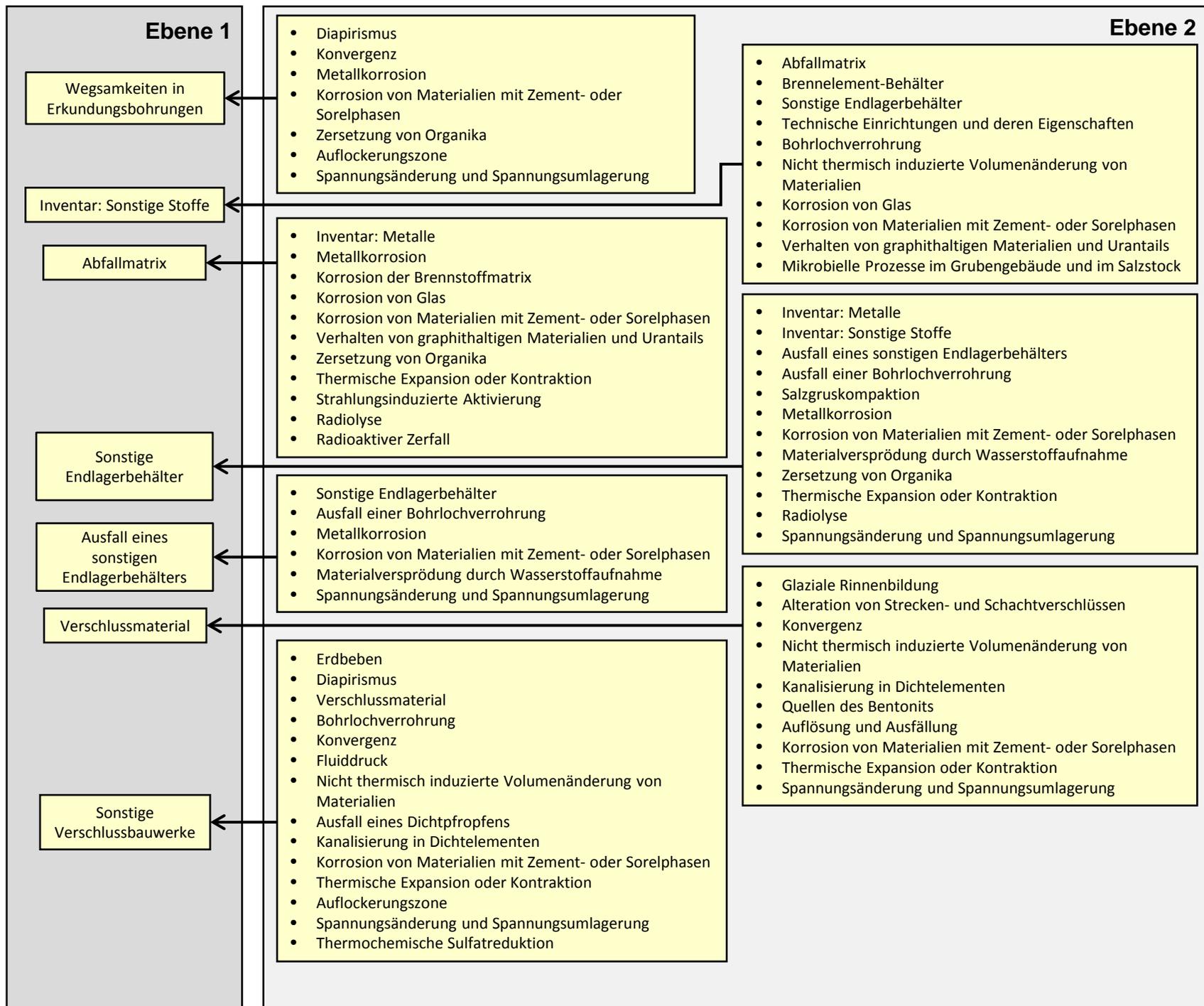
- Sonstige Endlagerbehälter
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Metallkorrosion
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Diapirismus
- Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

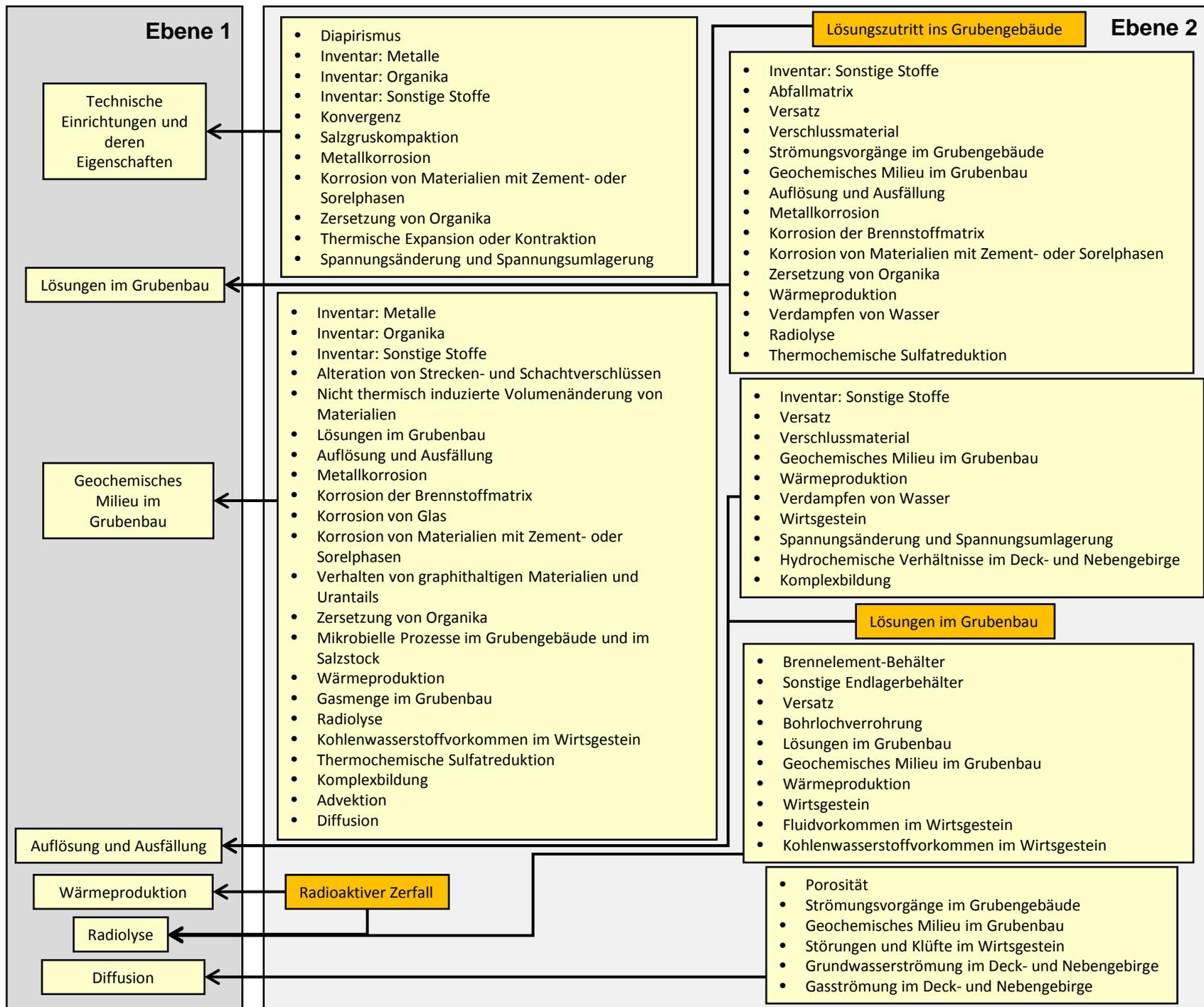
**Metallkorrosion**  
(2 von 2)



**Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen**  
(1 von 2)



**Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen**  
(2 von 2)



## Ebene 1

Inventar: Metalle

Brennelement-  
Behälter

Sonstige  
Endlagerbehälter

Bohrlochverrohrung

Geochemisches  
Milieu im Grubenbau

Gasmenge im  
Grubenbau

- Abfallmatrix
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Strahlungsinduzierte Aktivierung

- Inventar: Metalle
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Salzgruskompaktion
- Metallkorrosion
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Zersetzung von Organika
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Inventar: Metalle
- Inventar: Organika
- Inventar: Sonstige Stoffe
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Auflösung und Ausfällung
- Metallkorrosion
- Korrosion der Brennstoffmatrix
- Korrosion von Glas
- Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen
- Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails
- Zersetzung von Organika
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Radiolyse
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermochemische Sulfatreduktion
- Komplexbildung
- Advektion
- Diffusion

## Ebene 2

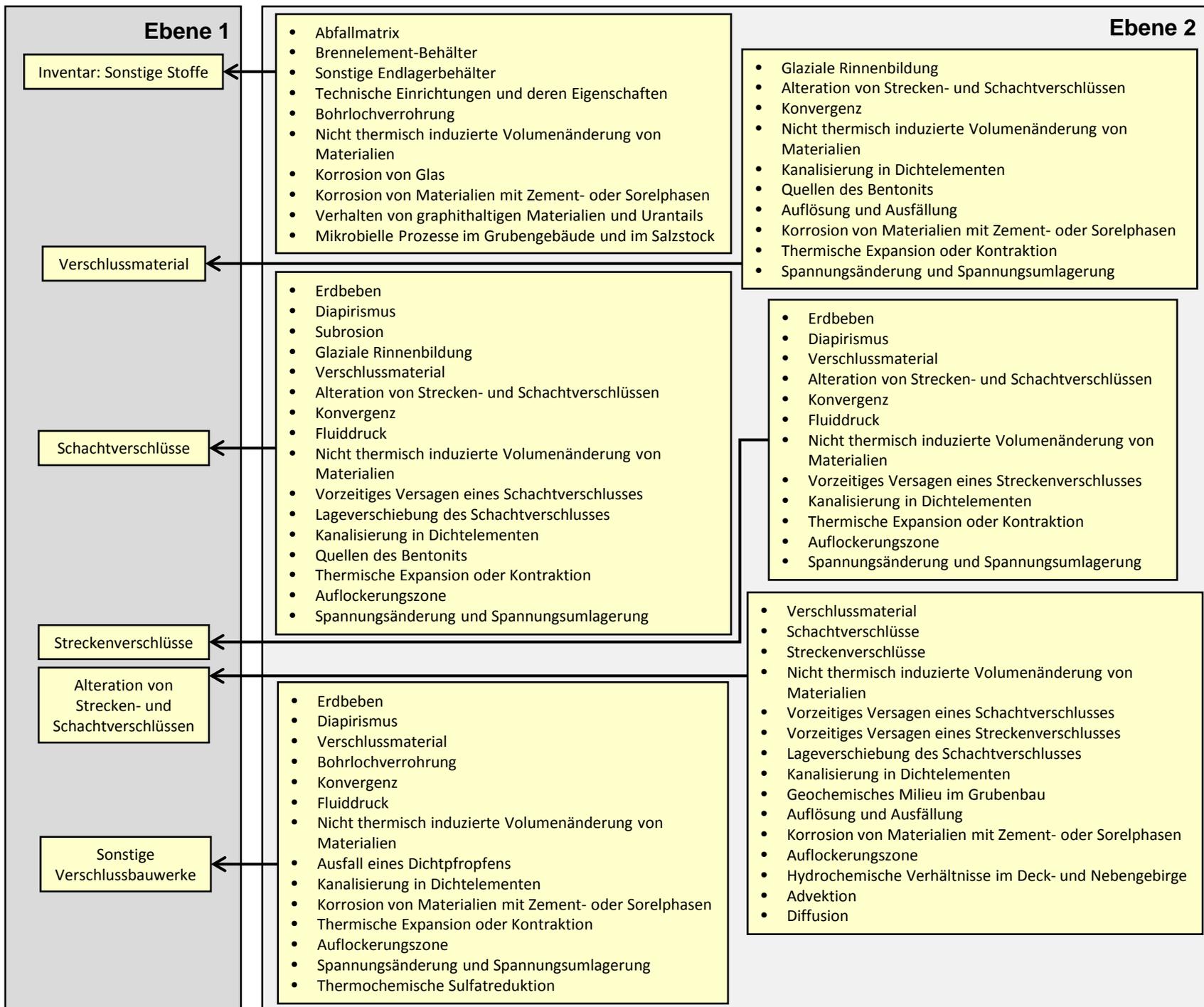
- Inventar: Metalle
- Versagen eines Brennelement-Behälters
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Salzgruskompaktion
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Zersetzung von Organika
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Erdbeben
- Diapirismus
- Inventar: Metalle
- Versatz
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

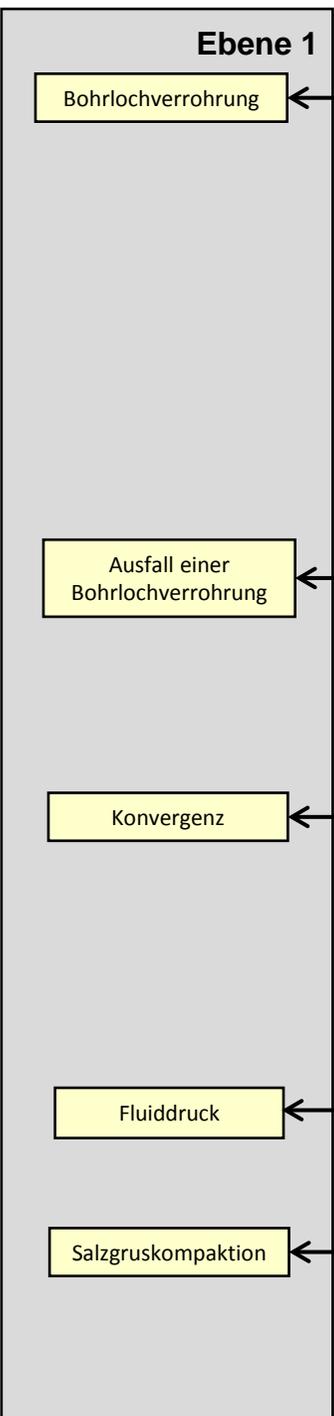
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Gasbildung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

**Material-  
versprödung  
durch  
Wasserstoff-  
aufnahme**

**Auflockerungszone**  
(1 von 3)



**Auflockerungs-  
zone**  
(2 von 3)



- Erdbeben
- Diapirismus
- Inventar: Metalle
- Versatz
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Metallkorrosion
- Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Hebung oder Absinken von Endlagerbehältern

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Ebene 2**
- Diapirismus
  - Bohrlochverrohrung
  - Konvergenz
  - Fluiddruck
  - Metallkorrosion
  - Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
  - Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Quellen des Bentonits
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Lösungen im Grubenbau
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

**Auflockerungszone**  
(3 von 3)

**Ebene 1**

**Ebene 2**

Quellen des Bentonits

- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Lösungen im Grubenbau
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Lösungszutritt ins Grubengebäude
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Wärmeproduktion

Thermische Expansion oder Kontraktion

- Abfallmatrix
- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge

Wirtsgestein

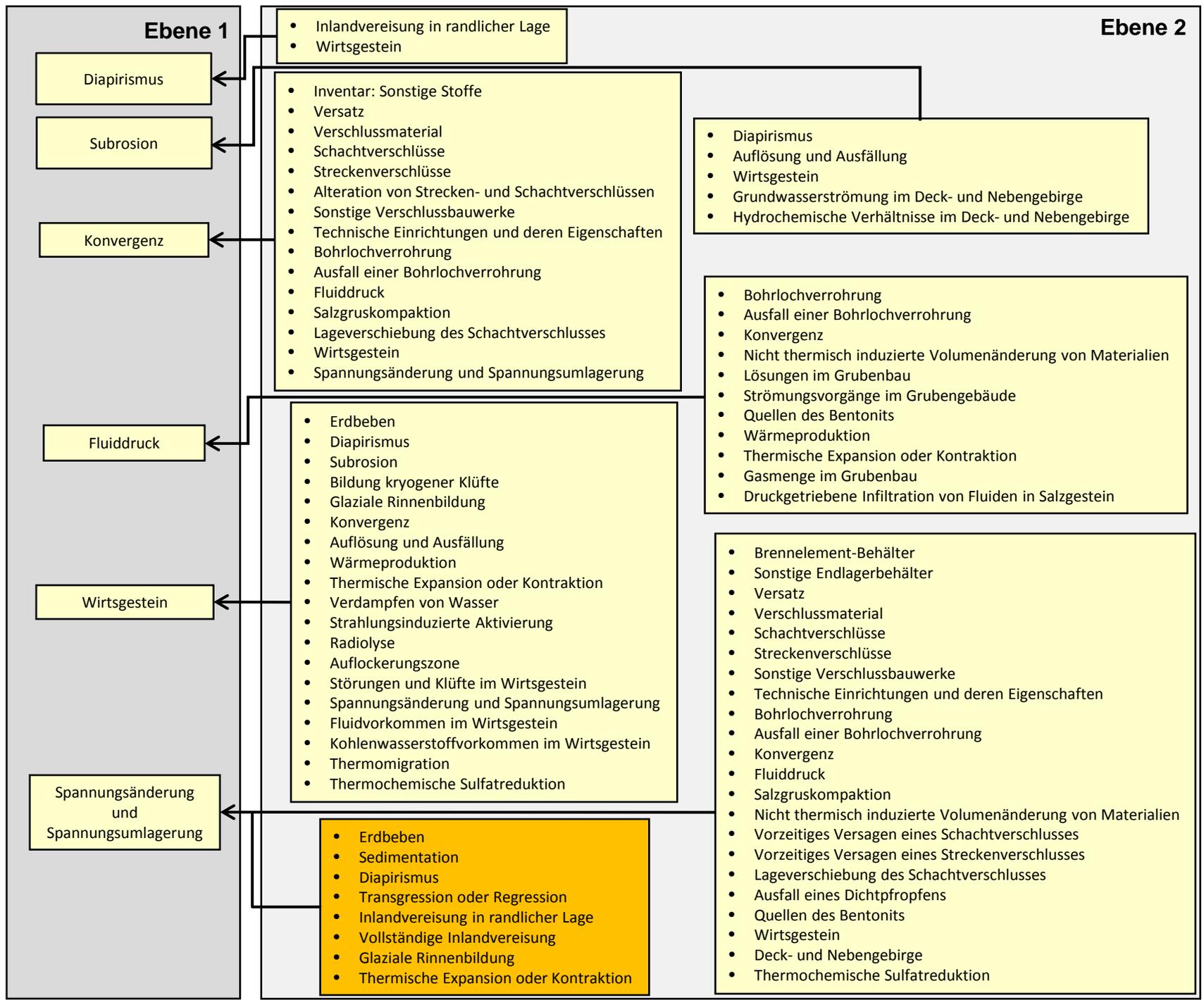
- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompektion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

**Störungen und Klüfte im Wirtsgestein**



**Ebene 1**

**Ebene 2**

Diapirismus

Subrosion

Konvergenz

Fluiddruck

Wirtsgestein

Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Wirtsgestein

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Versatz
- Verschlußmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

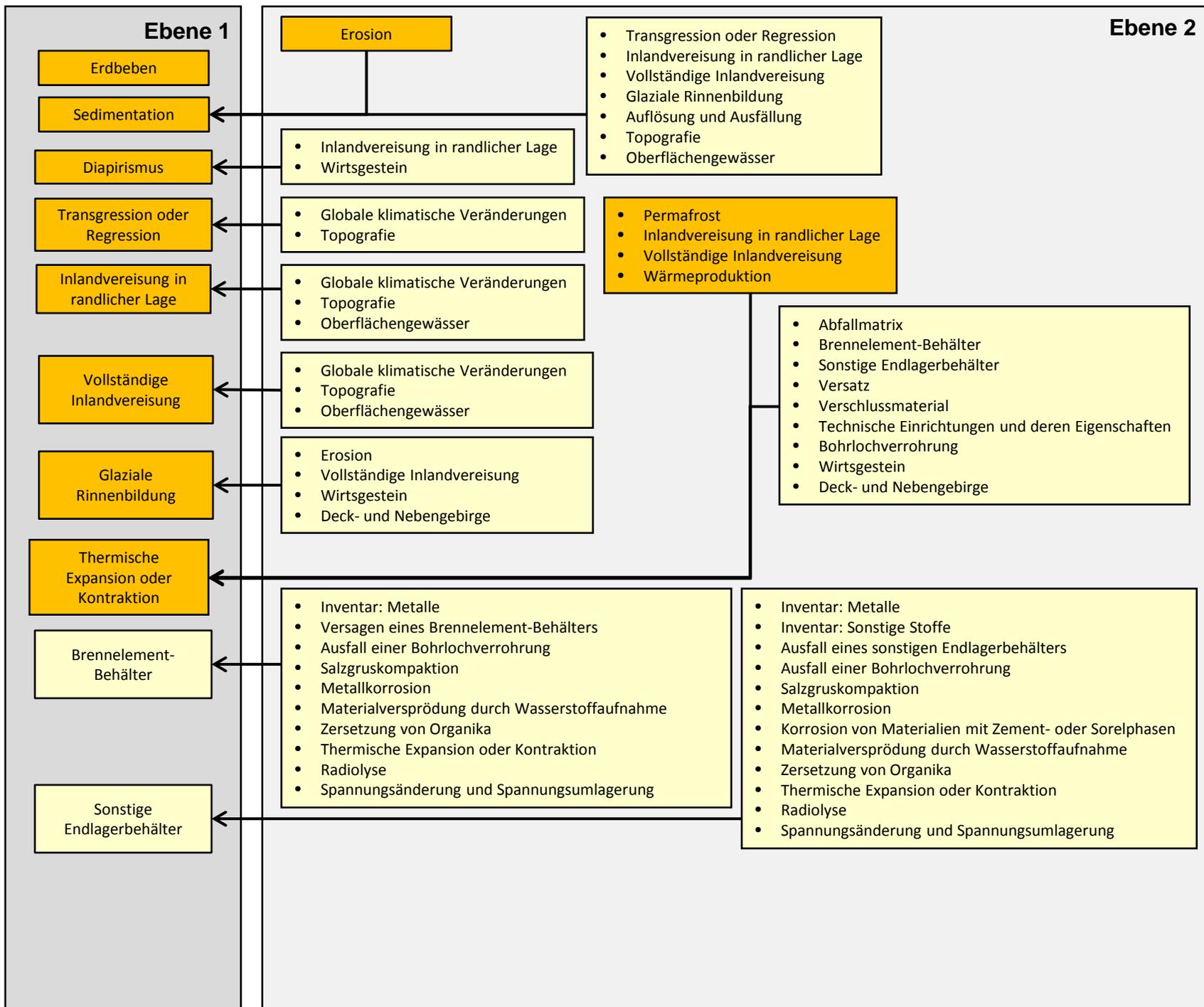
- Erdbeben
- Sedimentation
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Thermische Expansion oder Kontraktion

- Diapirismus
- Auflösung und Ausfällung
- Wirtsgestein
- Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge
- Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

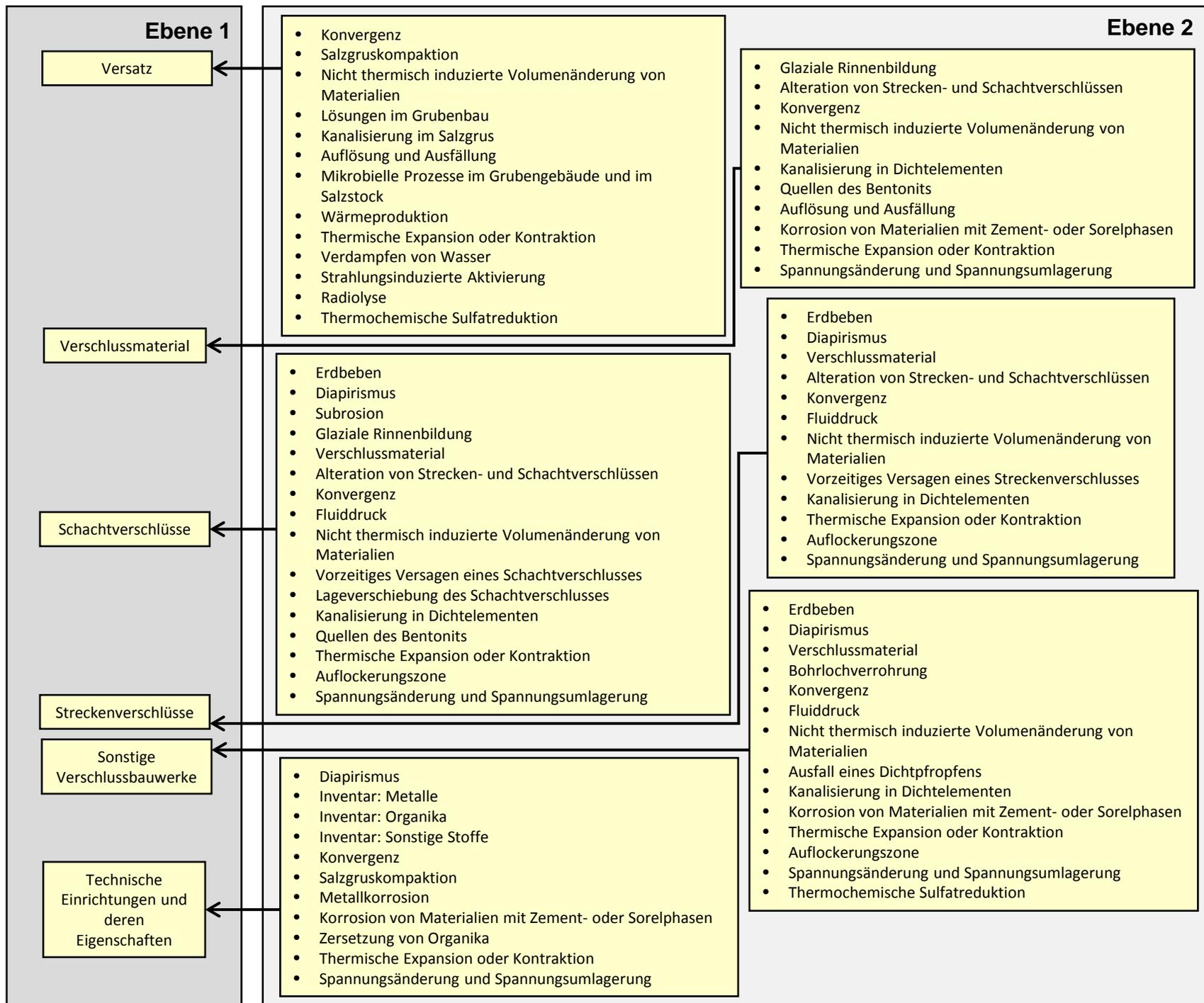
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Lösungen im Grubenbau
- Strömungsvorgänge im Grubengebäude
- Quellen des Bentonits
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in Salzgestein

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Verschlußmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Salzgruskompaktion
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
- Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Ausfall eines Dichtpfropfens
- Quellen des Bentonits
- Wirtsgestein
- Deck- und Nebengebirge
- Thermochemische Sulfatreduktion

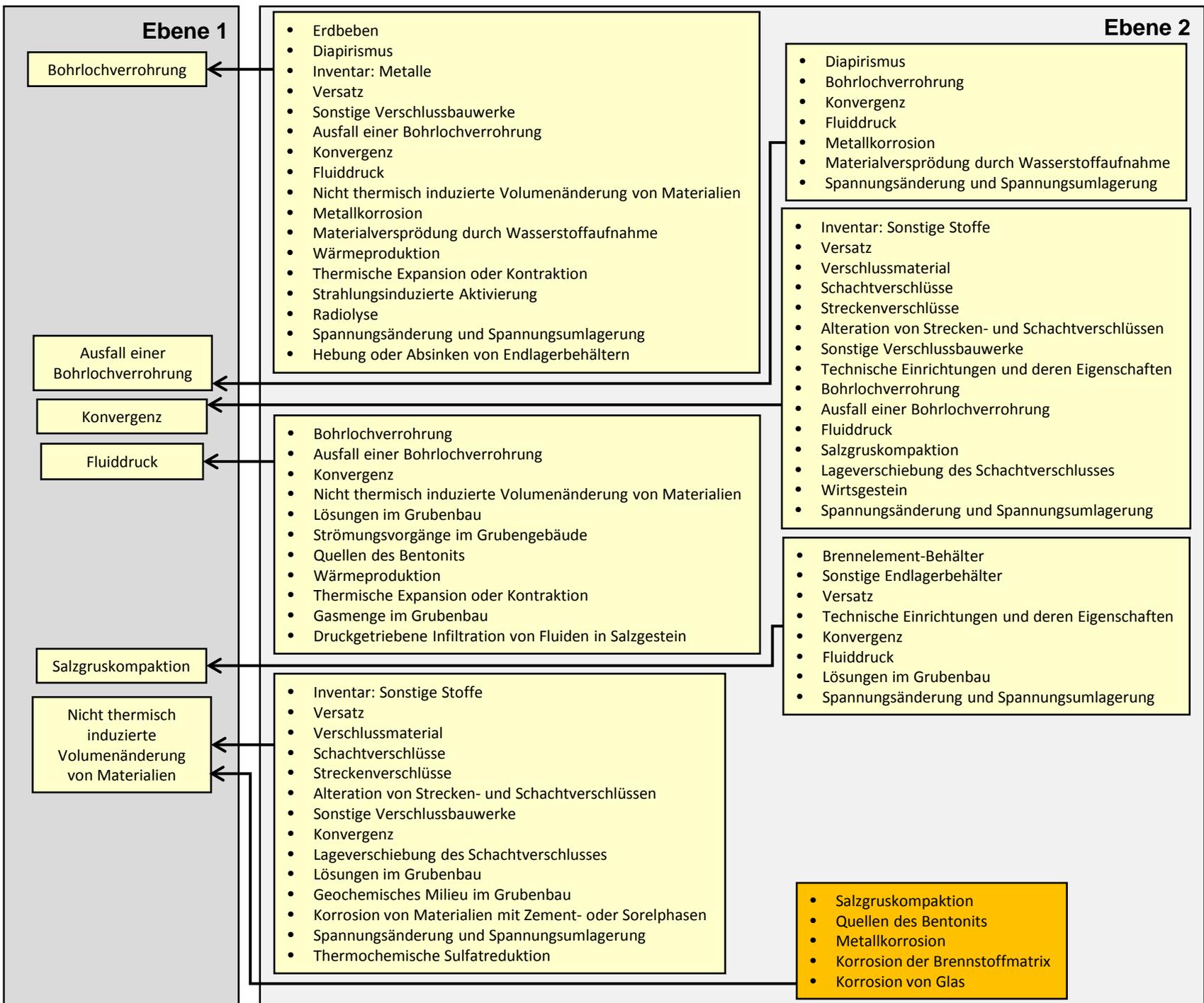
**Spannungs-  
änderung und  
Spannungs-  
umlagerung**  
(1 von 5)



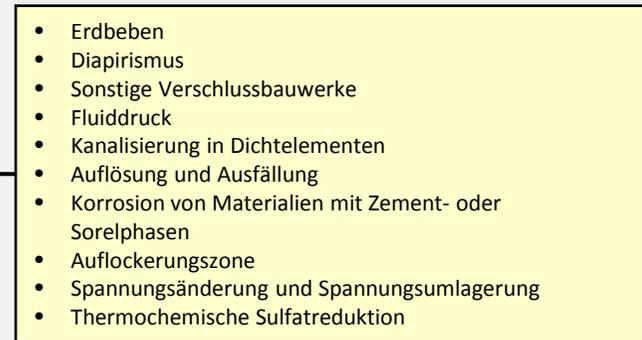
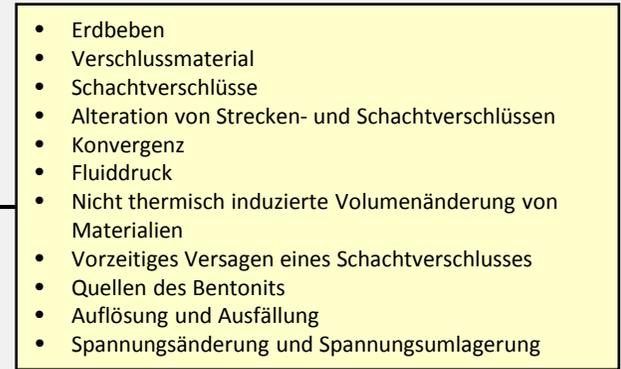
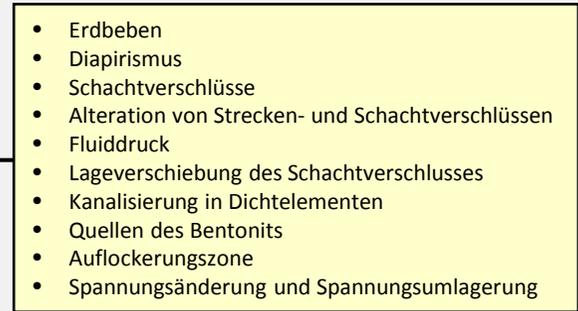
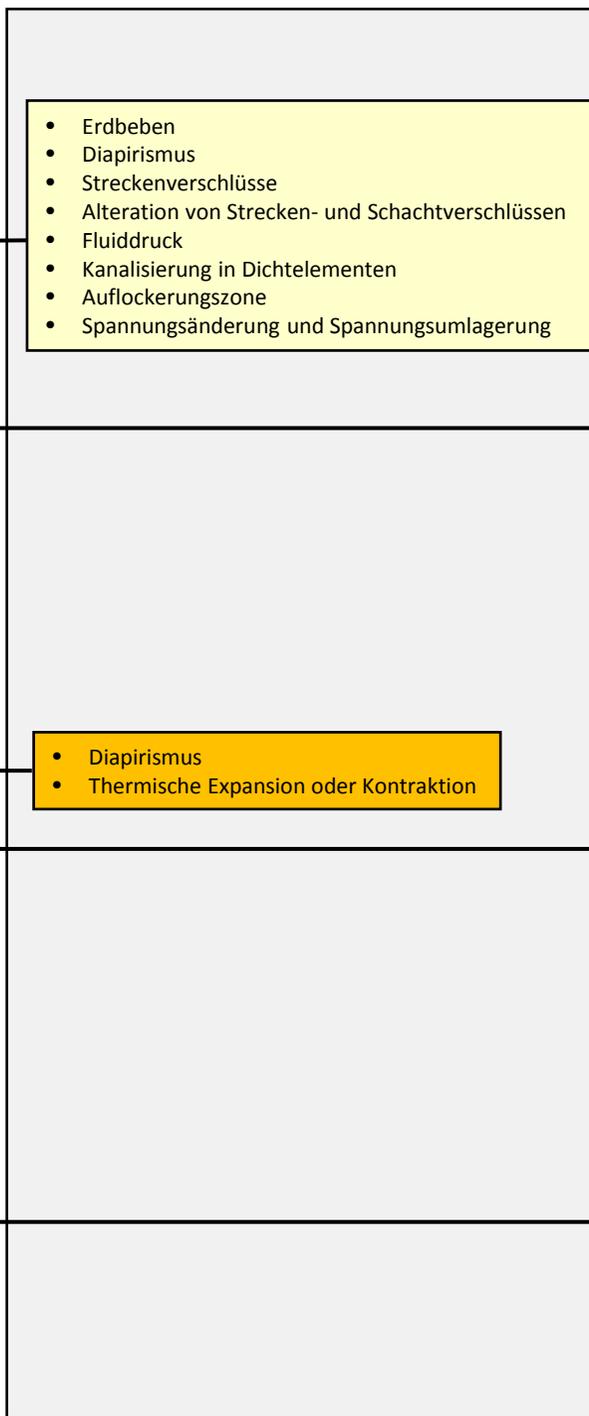
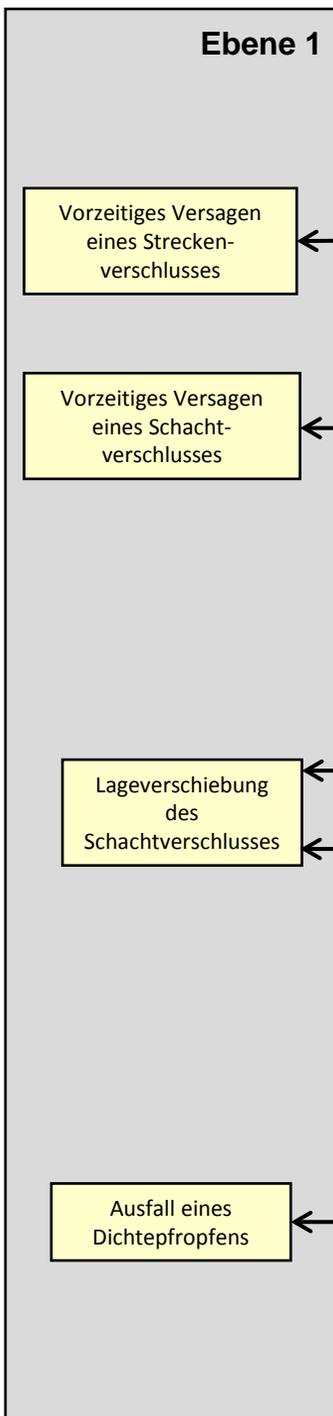
**Spannungs-  
änderung und  
Spannungs-  
umlagerung**  
(2 von 5)



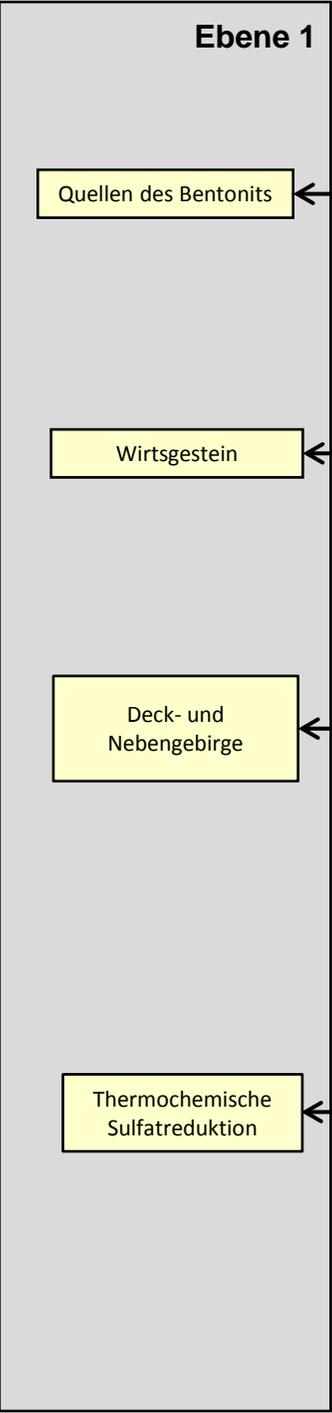
**Spannungs-  
änderung und  
Spannungs-  
umlagerung**  
(3 von 5)



**Spannungs-  
änderung und  
Spannungs-  
umlagerung**  
(4 von 5)



**Spannungs-  
änderung und  
Spannungs-  
umlagerung**  
(5 von 5)



- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Konvergenz
- Lageverschiebung des Schachtverschlusses
- Lösungen im Grubenbau
- Kanalisierung in Dichtelementen
- Lösungszutritt ins Grubengebäude
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Auflockerungszone
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Erosion
- Sedimentation
- Diagenese
- Diapirismus
- Transgression oder Regression
- Permafrost
- Inlandvereisung in randlicher Lage
- Vollständige Inlandvereisung
- Glaziale Rinnenbildung
- Auflösung und Ausfällung
- Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

- Ebene 2**
- Erdbeben
  - Diapirismus
  - Subrosion
  - Bildung kryogener Klüfte
  - Glaziale Rinnenbildung
  - Konvergenz
  - Auflösung und Ausfällung
  - Wärmeproduktion
  - Thermische Expansion oder Kontraktion
  - Verdampfen von Wasser
  - Strahlungsinduzierte Aktivierung
  - Radiolyse
  - Auflockerungszone
  - Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
  - Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
  - Fluidvorkommen im Wirtsgestein
  - Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
  - Thermomigration
  - Thermochemische Sulfatreduktion

- Versatz
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Wirtsgestein
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

## Ebene 1

## Ebene 2

### Radioaktiver Zerfall

- Brennelement-Behälter
- Sonstige Endlagerbehälter
- Versatz
- Bohrlochverrohrung
- Lösungen im Grubenbau
- Geochemisches Milieu im Grubenbau
- Wärmeproduktion
- Wirtsgestein
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

- Erdbeben
- Diapirismus
- Subrosion
- Bildung kryogener Klüfte
- Glaziale Rinnenbildung
- Konvergenz
- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Verdampfen von Wasser
- Strahlungsinduzierte Aktivierung
- Radiolyse
- Auflockerungszone
- Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein
- Thermomigration
- Thermochemische Sulfatreduktion

- Versatz
- Wärmeproduktion
- Gasmenge im Grubenbau
- Wirtsgestein
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein

- Inventar: Sonstige Stoffe
- Verschlussmaterial
- Schachtverschlüsse
- Streckenverschlüsse
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen
- Sonstige Verschlussbauwerke
- Bohrlochverrohrung
- Ausfall einer Bohrlochverrohrung
- Konvergenz
- Salzgruskompektion
- Quellen des Bentonits
- Thermische Expansion oder Kontraktion
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Diapirismus
- Subrosion
- Konvergenz
- Fluiddruck
- Wirtsgestein
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung

- Auflösung und Ausfällung
- Wärmeproduktion
- Auflockerungszone
- Wirtsgestein
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein

Radiolyse

Auflockerungszone

Wirtsgestein

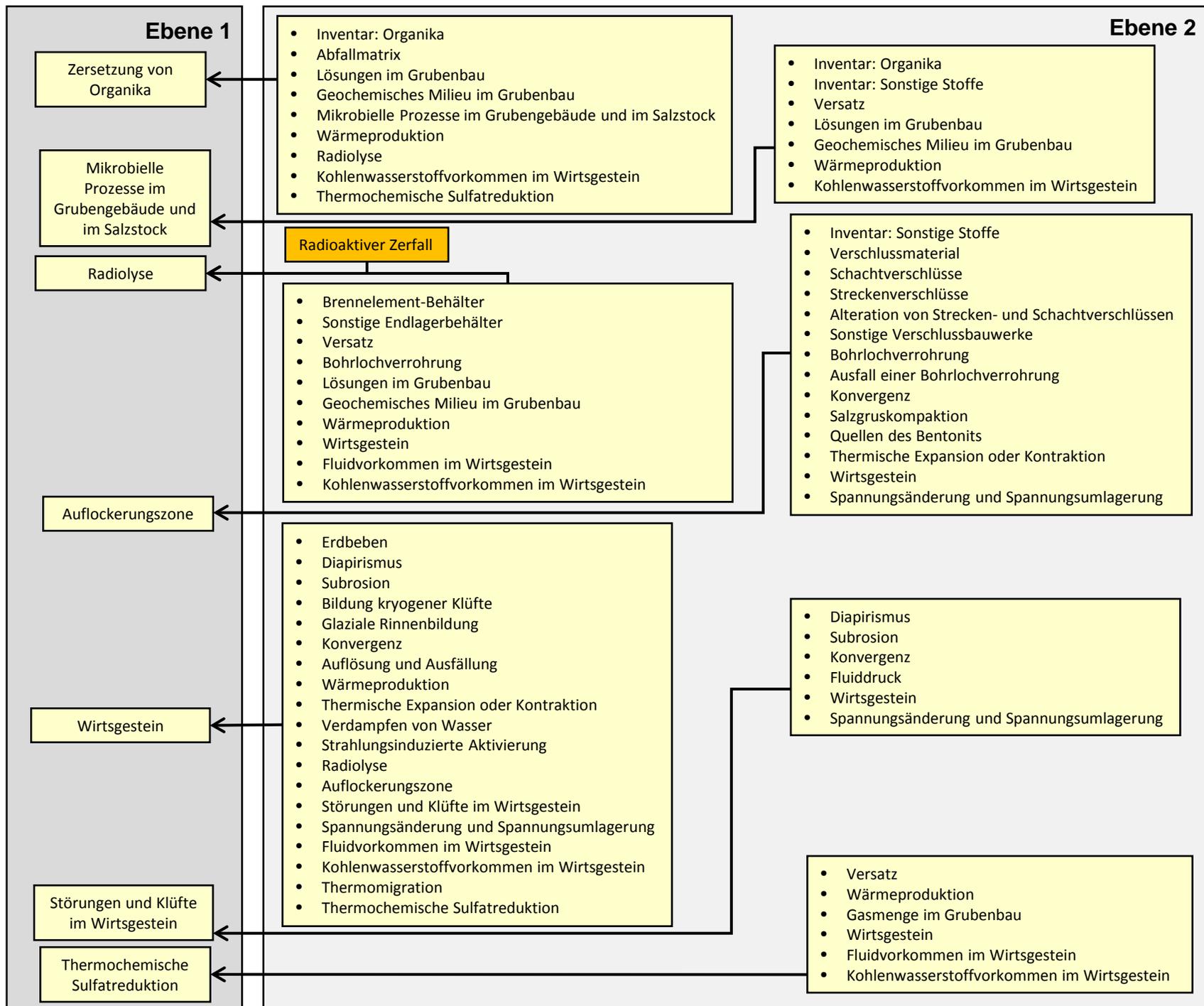
Störungen und Klüfte  
im Wirtsgestein

Thermomigration

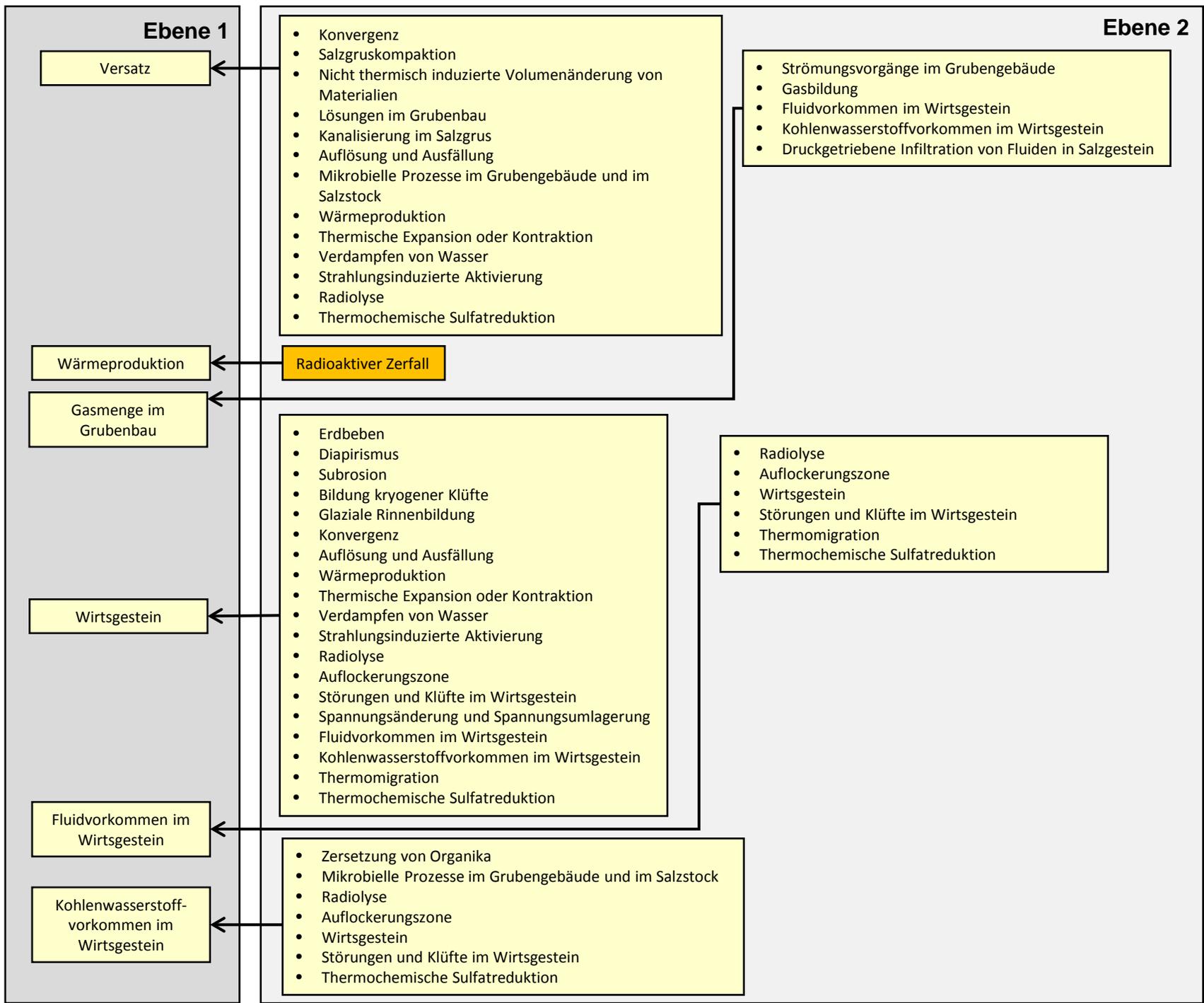
Thermochemische  
Sulfatreduktion

**Fluid-  
vorkommen  
im  
Wirtsgestein**

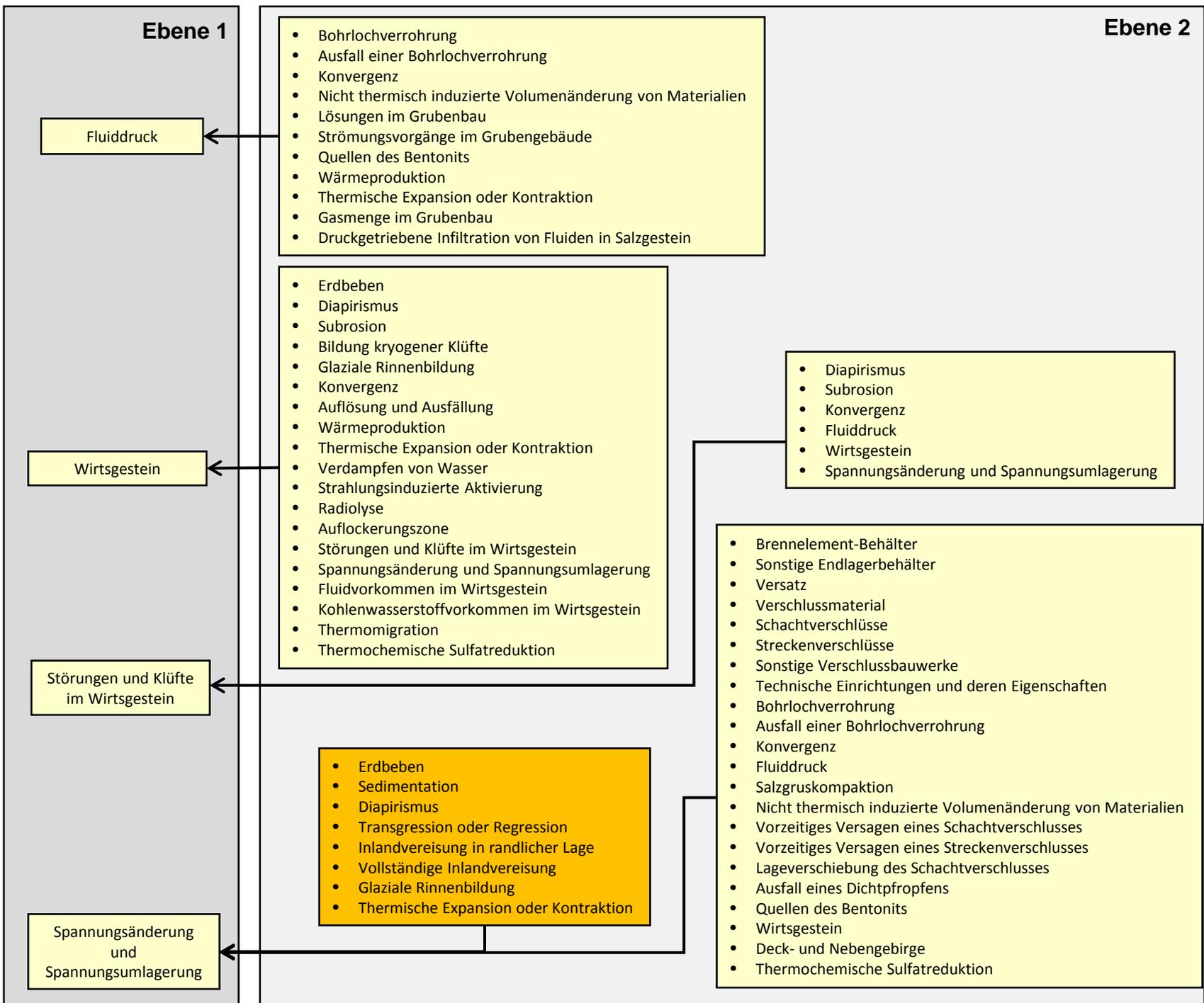
**Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein**



**Thermochemische Sulfat-reduktion**



**Druck-  
getriebene  
Infiltration von  
Fluiden in das  
Salzgestein**





Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## **Anhang D**

### **Erkundungsbohrungen im Salzstock Gorleben**

August 2012

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Erkundungsbohrungen am Standort Gorleben .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Übertägige Bohrungen .....</b>	<b>7</b>
3.1	Hydrogeologische Bohrungen und Grundwassermessstellen .....	7
3.2	Salzspiegelbohrungen .....	8
3.3	Tiefbohrungen .....	9
<b>4</b>	<b>Untertägige Erkundungsbohrungen.....</b>	<b>12</b>
4.1	Bohrungen im Bereich der Erkundungssohle .....	15
4.2	Erkundungsbohrungen bis zur 870 m-Sohle .....	16
4.2.1	Infrastrukturbereich.....	16
4.2.2	Erkundungsbohrungen bis in das Hauptsalz auf der 870 m-Sohle .....	17
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>25</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>28</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>30</b>

# 1 Einleitung

Die Unterlage beschreibt den aktuellen und geplanten Stand der Untersuchungen des Standorts Gorleben mit Hilfe von Erkundungsbohrungen. Die Unterlage bildet damit die Grundlage für die Beschreibung der Einwirkungen auf die Ausprägungen des weniger wahrscheinlichen FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* (Anhang B, Kap. 2.1) und die Diskussion möglicher Alternativszenarien, die aus diesem FEP abgeleitet werden können (Hauptband, Kap. 6.1.4.1, 6.2.4.1 und 6.3.4.1).

Zur Erkundung des Deckgebirges sowie der Wirtsgesteinszusammensetzung und Wirtsgesteinseigenschaften sowie seiner Internstrukturen sind neben dem Einsatz von geophysikalischen Untersuchungsverfahren (Seismik, EMR-Messungen) Erkundungsbohrungen von der Erdoberfläche oder aus dem Grubengebäude (untertägiger Erkundungsbereich) erforderlich. Die übertägigen Erkundungsbohrungen am Standort Gorleben umfassen 554 hydrogeologische Bohrungen, 44 Salzspiegelbohrungen und 4 Tiefbohrungen. Untertägige Erkundungsbohrungen (bis zum Moratorium 2001: 47) dienen der Untersuchung der potenziellen Einlagerungsformation (Hauptsalz) oder sicherheitsrelevanter Formationen (z. B. Hauptanhydrit, Kaliflöz). Nach Wiederaufnahme der Erkundung wurden bis Sept. 2011 14 weitere Erkundungsbohrungen durchgeführt und 13 Bohrungen sind im Zuge der Fortführung der Erkundung für 2012/2013 vorgesehen. Vorbohrungen für den Streckenvortrieb werden hier nicht betrachtet, da sie bei der Auffahrung überfahren und daher nicht sicherheitsrelevant sind. Eine Ausnahme ist der Fall, dass aufgrund der Bohrungsergebnisse vom ursprünglichen Streckenverlauf abgewichen wird.

Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit könnten die Erkundungsbohrungen – z. B. falls ihre Verfüllungen eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit aufweisen oder sich die Auflockerungszone nicht wie angenommen schließt – die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen. Eine derartige Entwicklung ist aufgrund der Verfüllung der Bohrungen nach bergrechtlichen Anforderungen wenig wahrscheinlich, aber z. B. durch Fehler bei der Verfüllung nicht völlig auszuschließen.

Wichtige Grundlagen zur Bewertung der langzeitsicherheitlichen Relevanz der Bohrungen sind neben den geometrischen Bohrlochdaten und den materialspezifischen Eigenschaften des Verfüllmaterials die Eigenschaften des umgebenden Gebirges. So können sich Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen in Salzformationen aufgrund der plastischen Eigenschaften des Salzes wieder schließen.

## 2 Erkundungsbohrungen am Standort Gorleben

Die übertägigen Erkundungsbohrungen umfassen die hydrogeologischen Bohrungen, die Salzspiegelbohrungen und die Tiefbohrungen. Die hydrogeologischen Bohrungen betreffen nur das Deckgebirge, während Salzspiegelbohrungen i. d. R. wenige Meter und nur in Einzelfällen bis maximal 230 m tief in den Salzstock reichen. Die Tiefbohrungen durchteufen das Einlagerungsniveau, aber sie sind an den Salzstockflanken angeordnet und nach bergrechtlichen Kriterien mit einem Sicherheitspfeiler von 20 m umgeben, in dem weder Auffahrungen noch Bohrungen stattfinden dürfen.

Im Grubengebäude wurden auf der Wettersohle (820 m) und auf der Erkundungssohle (840 m) im Infrastrukturbereich (einschließlich der Wendel um Schacht 1) sowie im Erkundungsbereich 1 (EB1) untertägige Erkundungsbohrungen zur Untersuchung des Wirtsgesteins durchgeführt. Diese Erkundungsbohrungen können ausnahmsweise verschiedene Grubenräume verbinden. Falls die Bohrungen lösungsführende Formationen anbohren, so treten solange Fluide aus dem begrenzten Reservoir aus, bis sich ein Druckgleichgewicht eingestellt hat. Bereits angebohrte Reservoirs besitzen daher keine Sicherheitsrelevanz mehr für das Endlagerbergwerk. Eine Relevanz von Bohrungen in der Nähe lösungsführender Reservoirs (z. B. klüftiger Hauptanhydrit-Schollen) ist nur dann gegeben, wenn die Bohrungen nicht ordnungsgemäß verfüllt sind und sich, z. B. durch thermomechanische Spannungen infolge der Aufheizung durch die wärmeentwickelnden Abfälle, Verbindungen zwischen Reservoirs, Bohrungen und dem Grubengebäude ergeben könnten. Daher sollen alle Erkundungsbohrungen einen Sicherheitsabstand zum Grubengebäude des Endlagers einhalten. Die erforderliche Mächtigkeit des Sicherheitspfeilers ist durch thermomechanische Modellrechnungen zu ermitteln. Die Grubengebäudeplanung auf der 870 m-Sohle kann an vorhandene Erkundungsbohrungen angepasst werden.

Die Anzahl der untertägigen Erkundungsbohrungen soll zwecks Vermeidung möglicher Beeinträchtigungen der Barrierenwirkung des Gebirges minimiert und der Verlauf der Bohrungen so geplant werden, dass möglicherweise lösungsführende Gesteinsbereiche, wie z. B. die Hauptanhydrit-Blöcke bzw. das Kaliflöz Staßfurt, in der Regel nicht angebohrt werden. Dies kann vermieden werden, da die Annäherung an diese Formationen durch vorherige EMR-Messungen aus den naheliegenden Strecken und Bohrungen sowie durch eine feinstratigraphische Ansprache der Kerne (ggf. ergänzt durch

geochemische Untersuchungen (Bromid-Gehalte)) frühzeitig erkannt und die Bohrung dann gestoppt werden kann.

Allerdings ist im Zuge der Standorterkundung neben der Untersuchung des Hauptsalzes auch eine Untersuchung der angrenzenden Formationen notwendig, um deren Eigenschaften bewerten zu können. Aus diesem Grund wurden Hauptanhydrit-Schollen oder das Kaliflöz auf der Erkundungssohle auch gezielt angebohrt. Beim Übergang vom Infrastrukturbereich zu den Einlagerungsbereichen müssen diese Formationen zudem im Querschlag 1 West und Querschlag 1 Ost durchfahren werden.

Die umfassenden geologischen Untersuchungen auf der Erkundungssohle ermöglichen eine Endlagerplanung für die 30 m tiefer liegende Einlagerungssohle. Außerdem können durch die umfassenden Erkundungsarbeiten die Untersuchungen auf der Einlagerungssohle begrenzt werden.

Entsprechend den oben dargestellten Zielen wurden bis 2001 im Zuge des Erkundungsprogramms besonders auf der 840 m-Sohle („Erkundungssohle“) im EB1 47 Erkundungsbohrungen gestoßen /BOR 08/, die durch weitere Bohrungen nach Wiederaufnahme der Erkundung im November 2010 ergänzt werden bzw. wurden. Um hieraus resultierende Beeinträchtigungen für den sicheren Einschluss der Abfälle auszuschließen, ist eine vollständige Trennung der Einlagerungsbereiche von der Erkundungssohle vorgesehen. Da im Bereich des EB1 zahlreiche Erkundungsbohrungen auch die Teufe der potenziellen Einlagerungssohle erreichen, werden nach derzeitigen Planungen im aktuellen Endlagerkonzept unterhalb des EB1 keine Einlagerungsbereiche angeordnet. Bei der Untersuchung weiterer Erkundungsbereiche ist vorgesehen, keine Bohrungen zu stoßen, die potenzielle Einlagerungsbereiche auf der 870 m-Sohle so tangieren, dass sie die Langzeitsicherheit beeinträchtigen.

Die räumliche Orientierung, Länge sowie Durchmesser und Anzahl der Erkundungsbohrungen ergeben sich aus ihren geologischen Zielstellungen bzw. aus dem Erkundungskonzept. Um die geologische Barriere durch Erkundungsbohrungen möglichst wenig zu beeinflussen, werden die Bohrungen mit einem geringen Durchmesser (ca. 46 mm bis maximal ca. 146 mm) gestoßen, ihre Anzahl minimal gehalten und die Bohrungen nach ihrer Nutzung (z. B. für Permeabilitätsmessungen oder geophysikalische Untersuchungen) verfüllt. Die Baustoffe für die Verfüllung werden dem in der Umgebung der Erkundungsbohrungen vorliegenden geochemischen Milieu angepasst bzw. ausgewählt. Bisher wurde hygroskopischer Magnesia-Binder, entweder in Form von

kaustischem Magnesit oder als Magnesiumoxid, als Verfüllmaterial verwendet. Die in den Bohrungen genutzten Ausbaumaterialien werden, mit Ausnahme der Standrohre, vor dem Verschluss der Bohrungen soweit wie möglich gezogen oder überbohrt, um Korrosionsprozesse und dadurch sich bildende Wegsamkeiten zu vermeiden. Z. Z. wird ein Qualitätssicherungssystem für die Herstellung der Baustoffe sowie die Durchführung der Verfüllmaßnahmen entwickelt.

Ordnungsgemäß, d. h. vollständig und lösungsdicht zementierte Bohrungen stellen keine Wegsamkeiten für Lösungen dar. Die vorgesehene Verfüllung mit Magnesia-Binder entspricht dem Stand der Technik im salinaren Milieu /KÖS 02/. Nach Untersuchungen für die qualifizierte Verfüllung von Bohrungen im Endlager Morsleben wurde die Langzeitstabilität des Magnesia-Binders im salinaren Milieu bestätigt /GLÄ 02/. Die Anfangspermeabilität des Magnesia-Binders liegt bei  $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  und damit ca. 1 Größenordnung über der geforderten Anfangspermeabilität des Baustoffs für die Streckenverschlüsse. Da die betrachteten Querschnittsflächen von Bohrungen aber um Größenordnungen kleiner sind als die der Streckenverschlüsse, liegen abweichende Permeabilitätsentwicklungen aufgrund unterschiedlichen Korrosionsverhaltens bei verschiedenen Lösungsmilieus in der Bandbreite der für den Langzeitsicherheitsnachweis zu gewährleistenden „Bauteilpermeabilität“ der Verschlussbauwerke. Somit ist eine Einzelfallbetrachtung im Langzeitsicherheitsnachweis erst erforderlich, wenn die Permeabilität der Bohrlochverfüllung um mehrere Größenordnungen höher wäre als die der Streckenverschlüsse /GLÄ 02/.

Falls aber ein dauerhafter, dichter Verschluss einer Bohrung nicht erzielt wurde, so kann diese die Integrität der geologischen Barriere im durchbohrten Bereich für einen begrenzten Zeitraum (Verschluss der Hohlräume durch Salzkriechen in einem Zeitraum von einigen 100 bis wenigen 1.000 Jahren) beeinträchtigen und Wegsamkeiten für Fluide darstellen. Mögliche Ursachen für die Entstehung von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen wurden im Zuge der Erstellung des FEP-Katalogs /WOL 12/ analysiert (FEP 1.5.03.01 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen, /GLÄ 02/). Als mögliche Ursachen für eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit wurden hier

- die Korrosion der Bohrlochverfüllung durch Zutritt von Lösungen mit abweichendem Chemismus,
- Fehler bei der Herstellung des Baustoffs oder bei der Verfüllung der Bohrung,

- eine Korrosion bzw. Biodegradation in der Bohrung verbliebener Ausbauteile, PE-Verfüllgestänge, Verfüllschläuche, etc. (derartige Relikte finden sich nur bei Bohrungen, bei denen Probleme bei der Erstellung oder Verfüllung aufgetreten sind) und
- ein verzögertes bzw. unvollständiges Verschließen der Auflockerungszone um das Bohrloch, z. B. durch hohen Fluiddruck infolge einer Gasbildung durch Korrosion, zutretende Fluide etc.)

identifiziert. Bisher sind 6 untertägige Erkundungsbohrungen aufgrund technischer Probleme unvollständig verfüllt (vgl. Abb. 4.1 und 4.2):

- 02YER02RB032: Bohrgestänge teilweise im Bohrloch verblieben, PE-Verfüllgestänge zerstört und teilweise im Bohrloch verblieben. Das Bohrloch ist auf einer Länge von ca. 380 m unverfüllt geblieben. Eine Sanierung des Bohrlochs durch Überbohren und Zementieren ist vorgesehen.
- 02YEA04RB023: Verfüllrohr und Packer nach Lösungs- und Gaszutritt im Bohrloch verblieben, von 187,0 – 192,5 m nicht verfüllt
- 02YER02/RB031: nach Lösungs- und Gaszutritt Packer im Bohrloch verblieben, untere 1,9 m des Bohrlochs unverfüllt
- 02YEF11/RB012: nach Lösungs- und Gaszutritt Packer im Bohrloch verblieben, untere 9,9 m des Bohrlochs unverfüllt
- 01YEF20/RB014: nach Lösungs- und Gaszutritt Packer im Bohrloch verblieben, untere ca. 23 m des Bohrlochs unverfüllt.
- 02YER02/RB233: nach Lösungs- und Gaszutritt 2 Packer im Bohrloch verblieben, untere 25 m des Bohrlochs unverfüllt

Die unverfüllten Bereiche der Bohrungen sind im Risswerk mit einem jeweils 20 m mächtigen Sicherheitspfeiler ausgewiesen worden. Falls eine sicherheitstechnische Bewertung negative Auswirkungen dieser Bohrungen für das Endlagersystem ergeben würde, so ist in allen Fällen eine Sanierung durch Überbohren und Neuverfüllen möglich. Weiterhin sind vermutlich bei den 29 von der Arbeitsgemeinschaft Gorleben (ASG) gebohrten Erkundungsbohrungen die Verfüllschläuche in den Bohrlöchern verblieben.

Eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit weiterer Bohrungen durch die im FEP-Katalog /WOL 12/ genannten Ursachen ist aufgrund der umfangreichen Qualitätssicherungsmaßnahmen weniger wahrscheinlich, aber – da z. B. menschliche Fehler nie vollständig verhindert werden können – nicht völlig auszuschließen. Im Folgenden werden mögliche Konsequenzen einer erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit einzelner Erkundungsbohrungen qualitativ analysiert und bewertet, ohne dabei im Einzelnen auf die Ursachen für die erhöhte hydraulische Durchlässigkeit der Bohrungsverfüllungen einzugehen.

### **3 Übertägige Bohrungen**

Zu Beginn der Erkundung wurden von übertage drei verschiedene Typen von Erkundungsbohrungen abgeteuft /BOR 08/:

- Hydrogeologische Bohrungen
- Salzspiegelbohrungen
- Tiefbohrungen

Ziel dieser Bohrungen waren eine Charakterisierung des Deck- und Nebengebirges, eine Bewertung der Subrosionsprozesse am Top der Salzstruktur und eine erste Übersicht über den Aufbau des Salzstocks.

#### **3.1 Hydrogeologische Bohrungen und Grundwassermessstellen**

##### **Ziele**

Erfassung der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge. Wichtig für die Auslegung der Schachtverschlüsse (Chemismus) und die mögliche Ausbreitung von Schadstoffen bis zur nächsten Kaltzeit.

##### **Anzahl und Position der Bohrungen**

Im Bereich Gorleben-Süd wurden 129 Aufschlussbohrungen, 322 Pegelbohrungen und 4 Brunnenbohrungen erstellt, im Bereich Gorleben-Nord (Dömitz-Lenzen) 22 Aufschlussbohrungen, 76 Pegelbohrungen und 1 Brunnenbohrung (Abb. 3.1, /BOR 08/, S. 7).

##### **Bohrungsmerkmale**

Die hydrogeologischen Bohrungen haben von Teufen von 20 m bis 356 m. Ihr Durchmesser beträgt 130 bis 200 mm. Die Verrohrung wurde z. T. vor der Verfüllung gezogen. Es kamen unterschiedliche Verfüllkonzepte zur Verwendung, wobei Zement-Bentonit-Gemische, Sulfex-Tixoton-Zement, Sulfex-Zement oder Füllsand in Kombination mit Tonsperren verwendet wurden.

Die hydrogeologischen Bohrungen betreffen nur das Deckgebirge. Bei nicht sachgerechtem Verschluss können die übertägigen Grundwassererkundungsbohrungen auf

die Grundwasserverhältnisse im Deck- und Nebengebirge geohydraulische Auswirkungen haben. Die Auswirkungen können die Verbindung von Grundwasserstockwerken betreffen, die unter natürlichen Bedingungen voneinander isoliert, d. h. durch gering-durchlässige Schichten getrennt gewesen wären.

### **3.2 Salzspiegelbohrungen**

#### **Ziele**

Erstellung einer geologischen Karte im Salzspiegelniveau. Untersuchung des Subrosionsverhaltens des Salzstocks (auch wichtig für die geowissenschaftliche Langzeitprognose). Zusätzliche Informationen zur Ermittlung von 2 Schachtansatzpunkten.

#### **Anzahl und Position der Bohrungen**

Es wurden 44 Salzspiegelbohrungen abgeteuft, deren Positionen Abb. 3.1 zu entnehmen sind.

#### **Bohrungsmerkmale**

Die Bohrungen besitzen eine Bohrlochlänge von 228,3 m – 501,0 m und reichen i. d. R. nur wenige Meter bis Zehnermeter in das Salinar. Die Salzspiegelbohrungen GoHy1302 bis 1305 dienten zur Untersuchung der Ablaugung des überkippt am Salzspiegel ausstreichenden Kaliflözes Staßfurt in der Gorlebener Rinne. Nur diese Bohrungen weisen eine größere Bohrlänge als 100 m im Salinar auf (GoHy1302: Salinar 47,5 m, Endteufe: 350,15 m, GoHy1303: Salinar 112,2 m, Endteufe: 413,2 m, GoHy1304: Salinar 143,5 m, Endteufe: 423,5 m, GoHy1305: Salinar 229,7 m, Endteufe: 501,0 m). Diese Bohrungen enden im Hauptanhydrit bzw. im Kaliflöz Staßfurt.

Die Bohrungsdurchmesser betragen 445 mm (Standrohr bis ca. 50 m), dann 311 bzw. 244 mm im Deckgebirge, ab Hutgestein: 159 mm, im Salinar 120 mm. Die Verrohrung wurde 1,3 m unter Gelände geschnitten und verblieb ansonsten vollständig im Bohrloch /BOR 08/ (S. 32).

Zur Verfüllung der Bohrungen wurde im Deckgebirge Hochofenzement verwendet und ab Hutgestein Sulfex-Zement (hoch sulfatbeständig).

Die Salzspiegelbohrungen, die zur Untersuchung der selektiven Subrosion des am Salzspiegel in überkippter Lagerung ausstreichenden Kaliflözes Staßfurt gestoßen wurden, reichen bis zu 230 m tief in das Wirtsgestein. Die abgelaugten Teile des Kali-

flözes sind durch quartäre und tertiäre Tone und Sande plombiert und durch halitische, kainitische und sylvinitische Ausfällungen wieder verschlossen. Auch durch Bohrlochverfüllungen mit erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten können nur geringe Ablaugungen engbegrenzter Bereiche des Kaliflözes stattfinden, da die entstehende schwere Kalilauge nicht abgeführt wird.

Selbst die tiefste Salzspiegelbohrung endet noch rund 385 m oberhalb des geplanten Einlagerungsniveaus. Auch bei Anbindung einer Hauptanhydrit-Scholle können keine Wegsamkeiten bis in das Einlagerungsniveau entstehen.

### **3.3 Tiefbohrungen**

#### **Ziele**

Klärung des Stoffbestandes und der Struktur des Salzstocks.

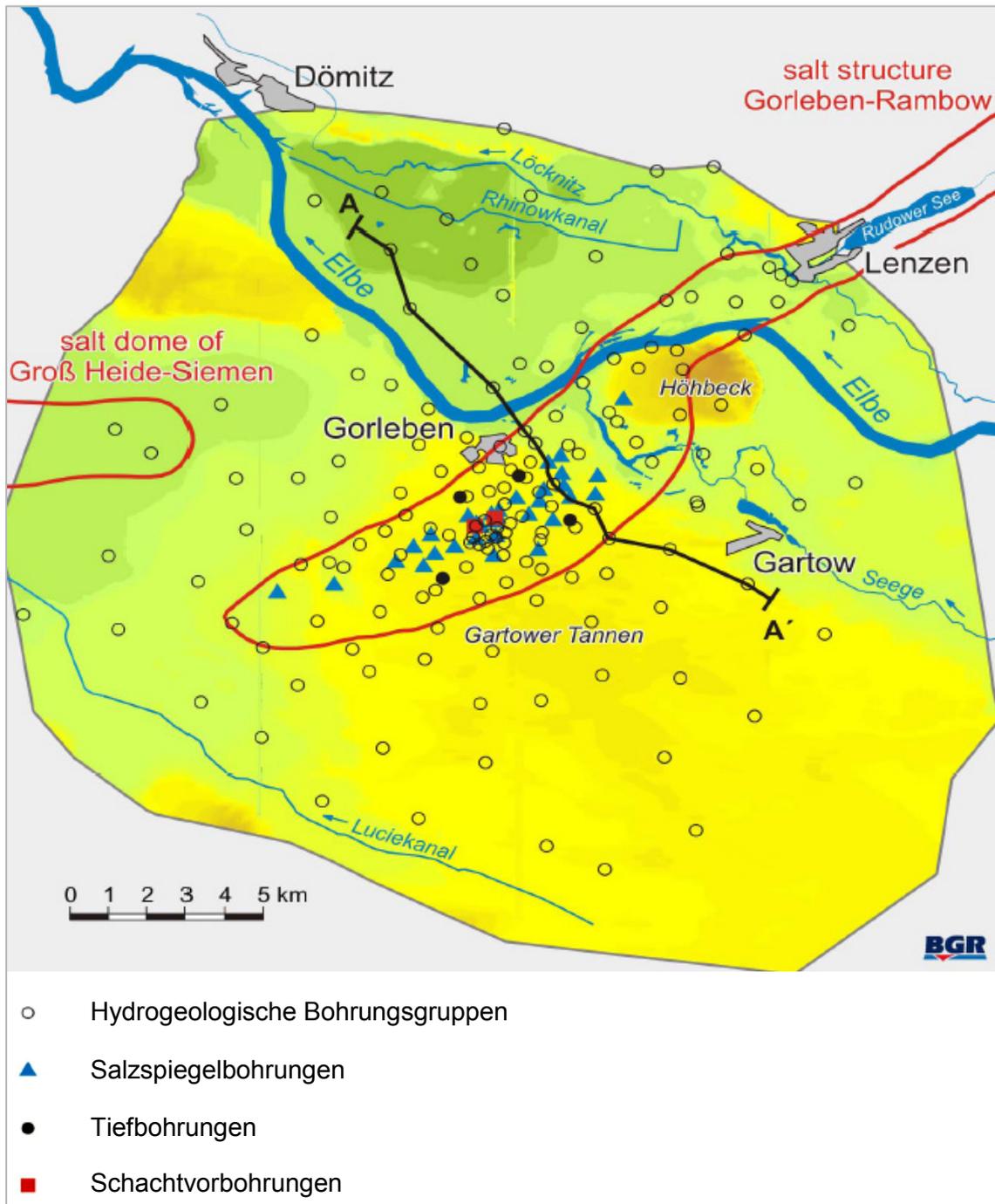
#### **Anzahl und Position der Bohrungen**

4 Tiefbohrungen in die Salzstockflanken bis in rund 2.000 m Tiefe. Davon 2 Bohrungen (Go 1002, Go 1003) in die NW-Flanke und 2 Bohrungen (Go 1004, Go 1005) in die SE-Flanke (Abb. 3.1).

#### **Bohrungsmerkmale**

Die Tiefbohrungen sind meist bis 100 m unter Salzspiegel verrohrt (Ausnahme: Go 1003: bis 250 m). Vor der Verfüllung wurden die Standrohre gezogen und die Schutzstandrohre überbohrt. Dadurch wurde der ursprüngliche Bohrlochdurchmesser von 120 mm auf ca. 200 mm aufgeweitet. Um die Bohrungen wurde für die Auffahrung der Grubenräume und die Erkundung ein Sicherheitspfeiler von 20 m festgelegt.

Verfüllung: Im Deckgebirge wurde Portland Zement Class C, ab dem Hutgestein Portland Zement Class G bzw. Magnesia-Zement verwendet und zusätzlich unterhalb des Salzspiegels eine Bentonit-Sperre eingebracht.



**Abb. 3.1** Positionen der übertägigen Erkundungsbohrungen im Umfeld des Salzstocks Gorleben (Abbildung BGR)

Die Bohrungen Go 1002 und Go 1003 befinden sich nördlich des Hauptsalz-Sattels in der Leine-Folge, wobei die Bohrung Go 1003 (nördlich des EB1) im Niveau der geplanten Einlagerungszone im Hauptanhydrit steht und die Go 1002 (nördlich des EB5) weiter östlich im Liniensalz.

Die Bohrungen haben auf der 870 m-Sohle einen Abstand von ca. 100 m (Go 1003) bzw. 150 m (Go 1002) zum geplanten Verlauf der Richtstrecke Nord. Dieser Abstand ist größer als der 50 m Sicherheitsabstand, den das in VSG geplante Grubengebäude zum Kaliflöz und Hauptanhydrit mindestens einhält.

Die Tiefbohrungen Go 1004 und Go 1005 haben im potenziellen Einlagerungsniveau Schichten der Leine-Folge (z3) aufgeschlossen. Sie befinden sich mehrere 100 m südlich des vorgesehenen Grubengebäudes.

## 4 Untertägige Erkundungsbohrungen

### Ziele

Auf der 820 m-Sohle (Wettersohle) und der 840 m-Sohle wurden bis Dez. 2001 47 Erkundungsbohrungen gestoßen, um detaillierte Informationen über den Internbau des Salzstocks zu liefern (Abb. 4.1, Abb. 4.2). Auf der Grundlage der dabei gewonnenen Daten wird das geologische Standortmodell des Internbaus des Salzstockes erstellt. Alle Erkundungsmaßnahmen, inklusive der Erkundungsbohrungen, dienen u. a. zum Nachweis, dass:

- das Hauptsalz als Einlagerungsmedium flächen- und volumenmäßig hinreichend zur Verfügung steht und keine langzeitsicherheitsrelevanten Gas- und Lösungsreservoirs sowie sekundäre Minerale wie z. B. Carnallit enthält,
- darüber hinaus keine Verbindung über Lösungspfade zwischen der Erkundungssohle und dem Aquifer über dem Salzstock besteht sowie
- keine Verbindungen der in den Hauptanhydrit-Schollen teilweise vorkommenden Lösungsreservoirs untereinander über größere Entfernung bestehen.

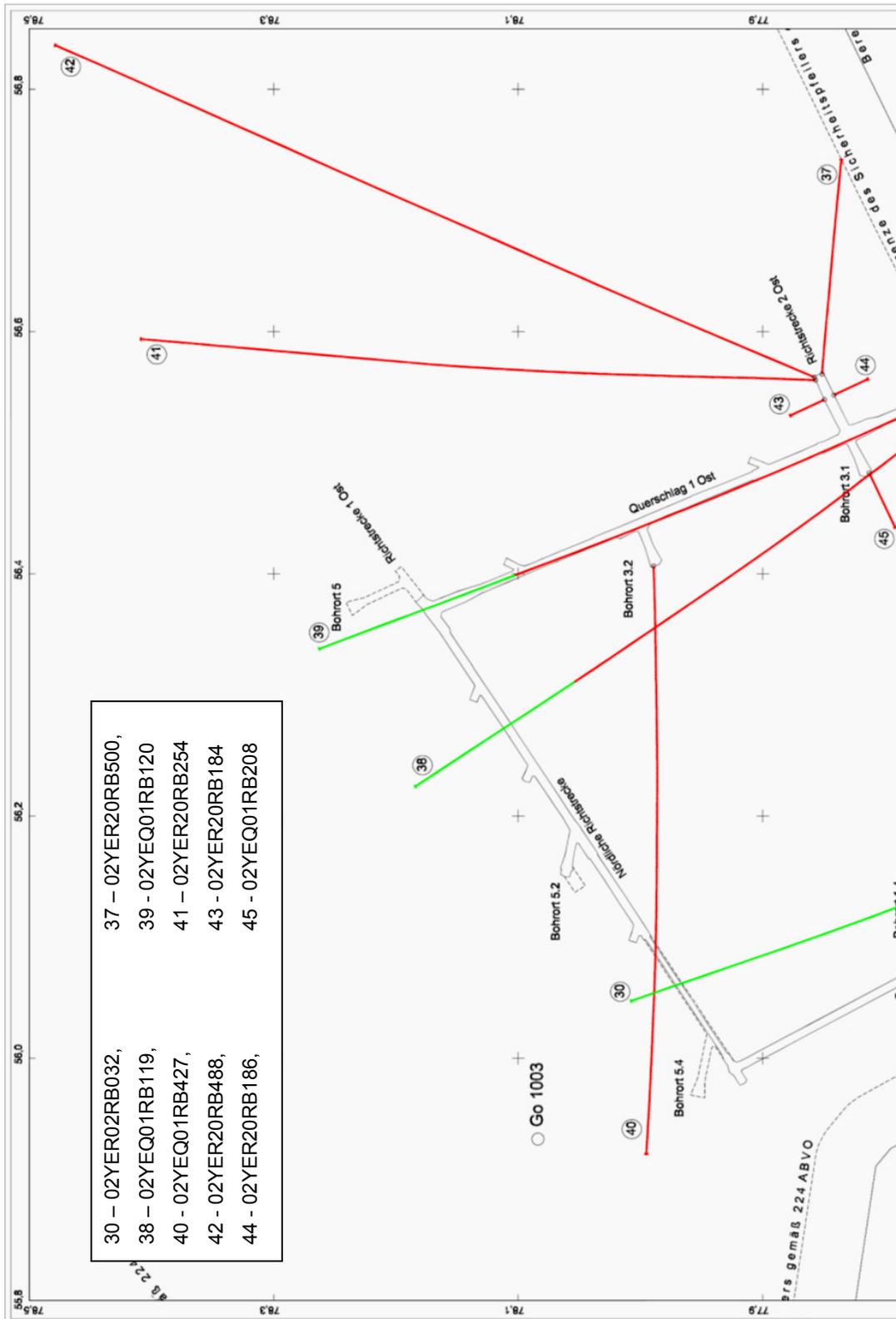
Weitere Bohrungen wurden nach dem Ende des Moratoriums ab November 2010 gebohrt bzw. sind geplant.

Während der Nachverschlussphase werden abgesehen von den Schächten keine Verbindungen zwischen den 840 m- und 870 m-Sohlen bestehen /BOL 12/. Verbindungen (Rolllöcher, Kabellöcher) sollen verschlossen werden.

### Bohrungsmerkmale

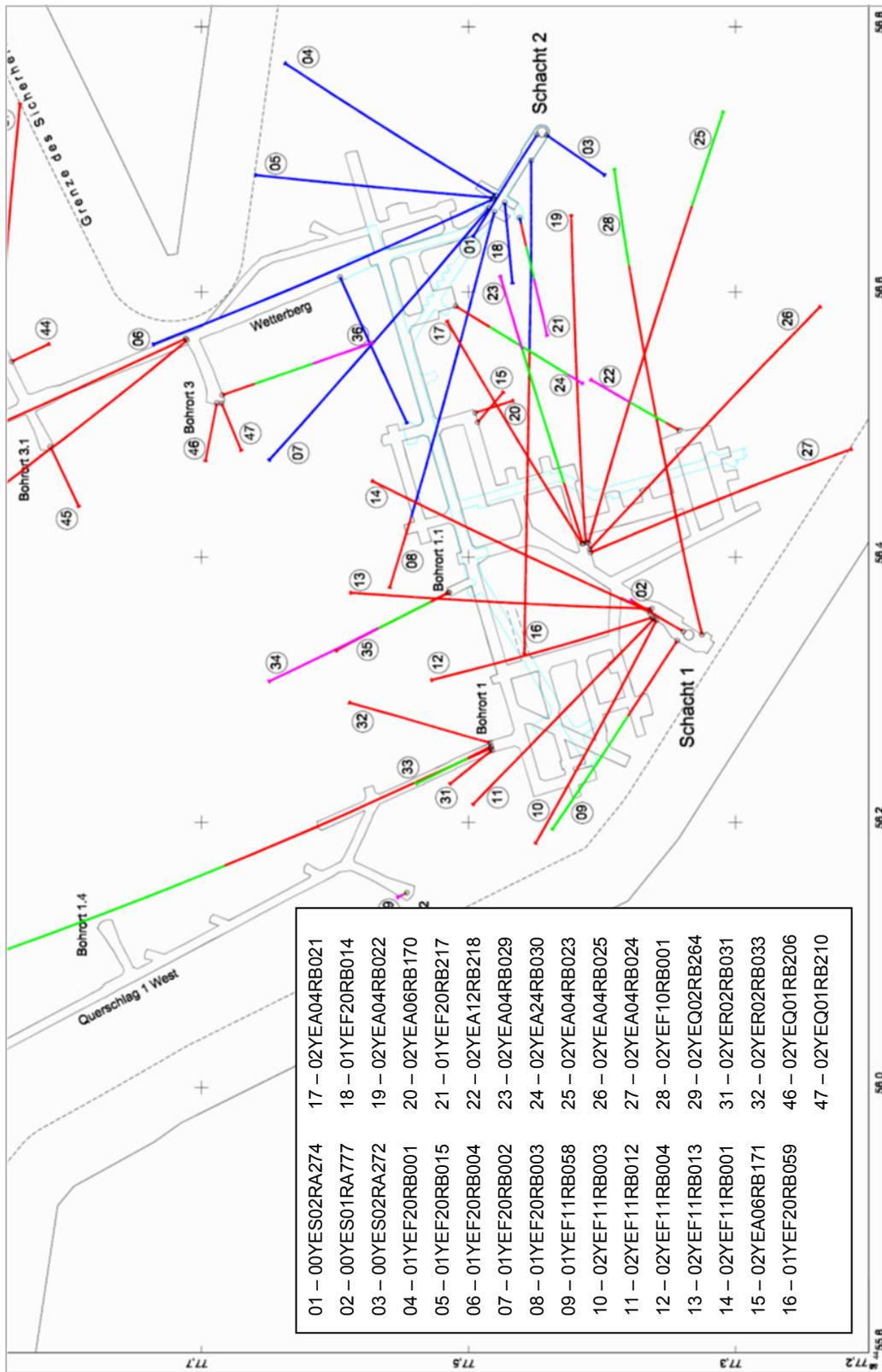
Die Erkundungs-, Untersuchungs-, Vorerkundungs-, Geotechnik- und Betriebsbohrungen weisen einen Bohrungsdurchmesser von 46 bis 146 mm auf. Die Länge der Bohrungen reicht von wenigen Metern bis 678,9 m. Je nach Untersuchungsziel sind die Bohrungen unterschiedlich geneigt (1 – 100 gon). Die Verfüllung der Bohrungen erfolgte qualitätsgesichert mit Magnesia-Zement.

Im Folgenden wird zwischen Bohrungen, die auf der Erkundungssohle verlaufen (horizontal bis schwach geneigt), und Bohrungen, die bis in das Niveau der potenziellen Einlagerungssohle reichen, differenziert.



**Abb. 4.1** Erkundungsbohrungen auf der 840 m-Sohle (Nord-Teil des EB1)

geneigte Bohrungen: 840 m-Sohle: rot, 880 m-Sohle (Wendelstrecke): grün (Abbildung DBE)



**Abb. 4.2** Erkundungsbohrungen auf der 840 m-Sohle (Süd-Teil des EB1)

geneigte Bohrungen: 820 m-Sohle: blau 840 m-Sohle: rot, 880 m-Sohle (Wendelstrecke): grün. 930 m-Sohle (Wendelstrecke): violett (Abbildung DBE)

#### **4.1 Bohrungen im Bereich der Erkundungssohle**

Von den bis Dez. 2001 auf der 840 m-Sohle im Bereich des EB1 gestoßenen Erkundungsbohrungen hat die Mehrzahl (33 Bohrungen) nur eine geringe Neigung (wenige gon) und erreicht daher nicht die 870 m-Sohle (Abb. 4.1, Abb. 4.2) /BOR 08/. Schwerpunkte der Untersuchungen waren einerseits die Erfassung der Grenze der Staßfurt/Leine-Folge im Norden und Süden des Hauptsattels und andererseits die Charakterisierung des Hauptsalzes als potenzielles Endlagermedium. Zwei Bohrungen (02YER02RB031, 02YEF11RB001, Abb. 4.2) wurden nach Lösungs- und Gaszutritten mit Packern abgedichtet, wobei der Bohrungsteil unterhalb des Packers dann nicht zementiert werden konnte. In 2011 wurde ein spezielles Erkundungsprogramm initiiert mit dem Ziel, die Verteilung der Kohlenwasserstoffe im Hauptsalz zu untersuchen /HAM 12/.

Bei der Untersuchung weiterer Erkundungsbereiche wird die Anzahl der Erkundungsbohrungen im Bereich des Hauptsalzes minimiert, um die Integrität potenzieller Einlagerungsbereiche nicht zu beeinträchtigen. Schwerpunkt ist dann die Erfassung der nördlichen und südlichen Grenze der Staßfurt- / Leine-Folge durch leicht geneigte und vertikale Bohrungen. Die für die Streckenauffahrung erforderlichen Vorbohrungen (Bohrfächer) sollen im Bereich der geplanten Auffahrung verlaufen und später überfahren werden. Sie werden vor der Auffahrung verfüllt. Falls aufgrund der Untersuchungsergebnisse vom ursprünglich vorgesehenen Streckenverlauf abgewichen wird, ist die Integrität des Gebirges durch die Verfüllung der Bohrungen wiederhergestellt.

Die flach geneigten Erkundungsbohrungen verlaufen überwiegend im Bereich der 840 m-Sohle bzw. in der Schwebe zwischen der 840 m- und der (geplanten) 870 m-Sohle.

Entsprechend dem gegenwärtigen Endlagerkonzept werden die Grubenräume des Erkundungsbergwerks (mit Ausnahme der Schächte) für den möglichen Betrieb eines Endlagers nicht genutzt, sondern komplett abgeworfen. Dabei werden die 820 m- und 840 m-Sohlen wie die potenzielle Einlagerungssohle mit Salzgrus verfüllt und in den Richtstrecken an der Grenze Staßfurt/Leine-Folge Streckenverschlüsse errichtet. Der Infrastrukturbereich wird mit Schotter verfüllt.

Aufgrund dieser Sohlentrennung hat eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit von Erkundungsbohrungen auf der 840 m-Sohle keine direkten Auswirkungen auf die 870 m-Sohle.

Falls auf der 840 m-Sohle durch eine Erkundungsbohrung mit erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten Lösungen aus dem Wirtsgestein in den Speicherraum des Infrastrukturbereiches gelangen, so reagieren diese Lösungen hier mit dem eingebrachten Bischoffit. Die so gesättigten Lösungen werden nicht zu einer Korrosion des unteren Dichtelementes des Schachtverschlusses führen.

## **4.2 Erkundungsbohrungen bis zur 870 m-Sohle**

Im Hinblick auf die mögliche spätere Nutzung des Standortes für die Auffahrung eines Endlagerbergwerks wurden bis Sept. 2011 14 Erkundungsbohrungen mit einer Neigung von bis zu 80 gon gestoßen, um Informationen über das potenzielle Einlagerungsniveau zu erlangen (Abb. 4.1, Abb. 4.2) /BOR 08/. Weitere 13 geneigte Bohrungen sind im Zuge der Fortführung der Erkundung 2012 / 2013 vorgesehen (Planungsstand 05.03.2012) (Abb. 4.3). Die genannten Bohrungen wurden bzw. werden im Infrastrukturbereich und im EB1 bzw. am Nord- und Südrand des EB3 gestoßen und befinden sich im Bereich der 870 m-Sohle in einem nicht für die Endlagerung vorgesehenen Bereich nördlich der Schächte /BOL 12/. In den anderen, zukünftig aufzufahrenden Erkundungsbereichen sind keine Erkundungsbohrungen vorgesehen, die in potenzielle Einlagerungsbereiche hineinreichen.

### **4.2.1 Infrastrukturbereich**

#### **Sachlage**

Zwischen den Schächten 1 und 2 wurden zahlreiche Erkundungsbohrungen gestoßen, um die Ausdehnung und die geologischen Verhältnisse im Umfeld der Staßfurt-Aufdomung in diesem Bereich zu untersuchen (/BOR 08/, S.43). Sechs der Bohrungen (02YEF10RB001, 01YEF20RB217, 02YEF12RB218, 02YEA04RB023, 02YEA04RB029 und 02YEA24RB030, vgl. Abb. 4.2) sind stärker geneigt und durchteufen das 870 m-Niveau der potenziellen Einlagerungssohle. Die Bohrungen erreichen die 870 m-Sohle im Bereich des Infrastrukturbereiches. Nur zwei der Bohrungen verlaufen in unmittelbarer Nähe zu geplanten Grubenräumen auf der 870 m-Sohle: Die Bohrung 01YEF20/RB217 verläuft 6 m neben einer geplanten Strecke und die Bohrung

02YEA04/RB023 verläuft 15 m oberhalb einer geplanten Strecke (Abb. 4.2). In der Bohrung 02YEA04RB023 sind die Verfüllrohre und ein Packer in der Bohrung verblieben. Die Verfüllung ist im mittleren Teil unvollständig. Bei den Bohrarbeiten sind Lösungs- und Gaszutritte aufgetreten.

#### **4.2.2 Erkundungsbohrungen bis in das Hauptsalz auf der 870 m-Sohle**

##### **Sachlage**

Zur Bestimmung der südlichen Grenze zwischen Staßfurt (z2) und Leine-Folge (z3) (Kaliflöz Staßfurt / Hauptanhydrit) wurde auf der 840 m-Sohle eine Reihe von Erkundungsbohrungen gestoßen, von denen folgende das 870 m-Niveau erreichen: 01YEF11/RB058 (Füllort Schacht 1), 02YER02/RB233 (Bohrort 1), 02YEQ02/RB264 (Bohrort 1.2), 02YER02/RB261 (Bohrort 1.1) und 02YEQ01/RB194 (Bohrort 3). Zur Begrenzung von Lösungs- und Gaszutritten sind in der Bohrung 02YER02/RB233 zwei Packer im Bohrloch verblieben und die unteren 25 m des Bohrlochs sind unverfüllt geblieben.

Darüber hinaus wurden Bohrungen zur Lagebestimmung der nördlichen Grenzzone Staßfurt / Leine-Folge des EB1 gestoßen, von denen 3 Bohrungen die 870 m-Sohle erreichten:

02YER02/RB032 (Bohrort 1), 02YEQ01/RB119 und 02YEQ01/RB120 (beide Bohrungen: Querschlag 1 E, Höhe Bohrort 3) (Abb. 4.1).

Diese Bohrungen durchqueren – überwiegend im Bereich der Schweben – die Hauptsalzbereiche unterhalb des EB1. Weiterhin wurden im Bereich der Erkundungslokationen EL1, EL2 und EL4 30 m lange vertikale Bohrungen gestoßen. Dieser Bereich wird entsprechend der Endlagerplanung in VSG nicht als Einlagerungsbereich genutzt /BOL 12/. Hier sind auf der 870 m-Sohle die Richtstrecke Nord sowie 3 Querschläge als Anbindungen an den Infrastrukturbereich vorgesehen. Die mit 3 gon geneigte, 568 m lange Bohrung 02YER02RB032 verläuft ca. 30 m unterhalb der Richtstrecke Nord. Die Bohrung ist aufgrund technischer Probleme z. Z. weitgehend unverfüllt. Eine Sanierung und Zementation der Bohrung ist geplant.

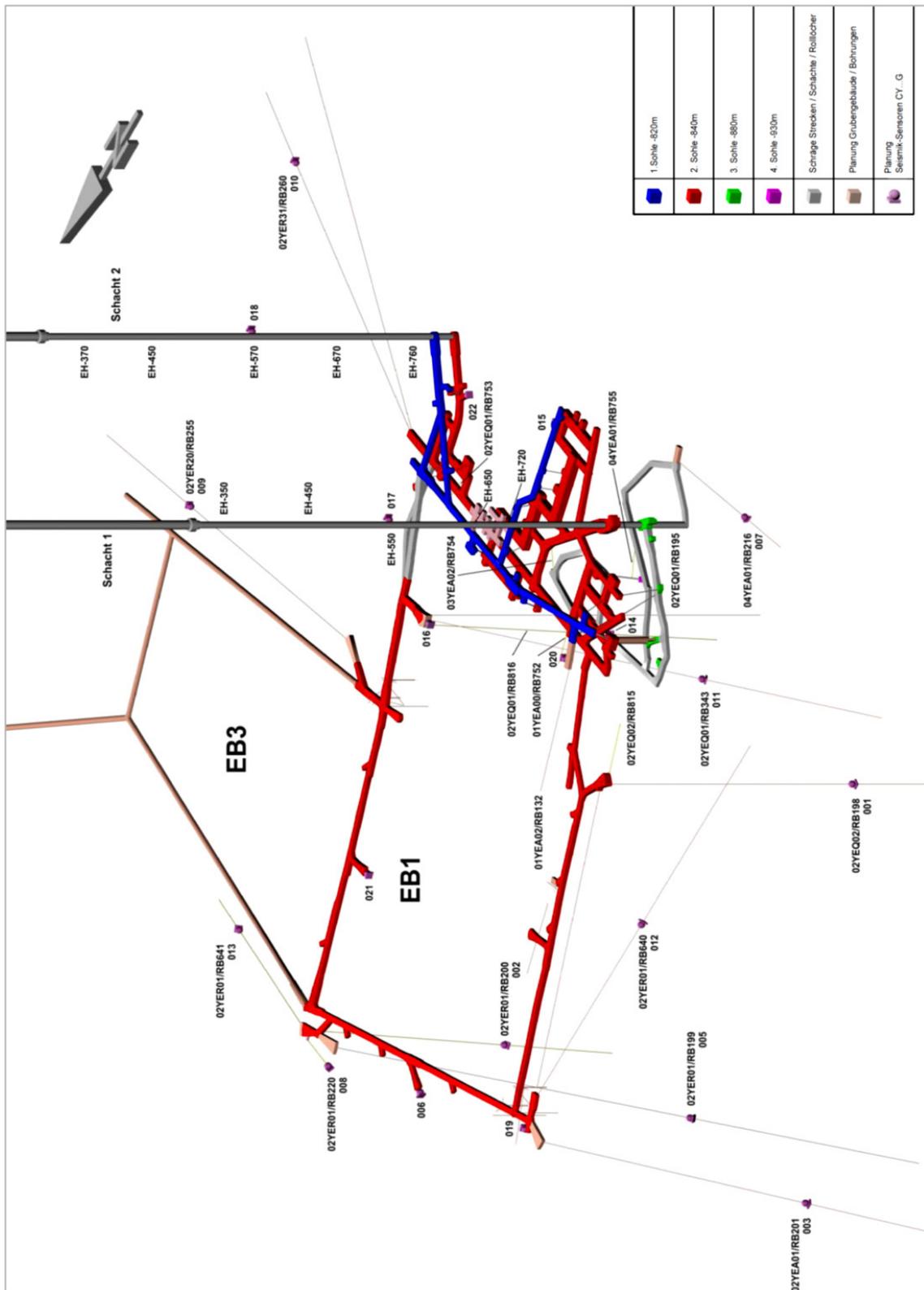
Nach Ende des Moratoriums wurde für die Wiederaufnahme der Erkundung ein neues Erkundungsprogramm geplant. Dieses sieht ergänzend zu den oben genannten Bohrungen eine Reihe weiterer Bohrungen vor, um die Grenze Staßfurt/Leine-Folge in tie-

feren Bereichen des Salzstocks zu erfassen und das Hauptsalz zu untersuchen. Zu diesem Zweck sollen am N-Rand die folgenden Bohrungen gestoßen werden (angegeben ist die Bohrungsneigung, die Bohrungslänge ist noch nicht in allen Fällen festgelegt) (Abb. 4.3, Abb. 4.4):

- Bohrort 5.4 Süd: 02YEQ02RB640 (Neigung: 23 gon: in südliche Richtung, Untersuchung Kohlenwasserstoffführung des Hauptsalzes), 02YEQ02/RB750, 02YEQ02/RB751 (Neigung: 100 gon, Länge 50 m) , 02YEQ02/RB201 (Neigung 80 gon) ,
- Bohrort 5.2 (02YER01/RB 205: 100 gon, 440 m)<sup>1</sup>
- Bohrort 5 (02YER01/RB199: 46 gon, 650 m Länge (entsprechend 440 m vertikale Tiefe), 02YER01/RB200: 80 gon, 02YER01/RB641: 20 gon)

---

<sup>1</sup> Bohrung entfällt möglicherweise



**Abb. 4.3** 3D-Darstellung des Grubengebäudes mit den geplanten Erkundungsbohrungen (Ersteller: DBE)

Zur Erkundung des S-Randes sind folgende Bohrungen vorgesehen (Abb. 4.5):

- Bohrort 1.2: 02YEQ02/RB 198: (Neigung: 100 gon, Länge: 440 m),
- Bohrort 3: 02YEQ01/RB 816 (Neigung: 77 gon), 02YEQ01/RB195 (Neigung: 100 gon, Länge: 440 m), 02YEQ01/RB 343 (Neigung: 70 gon)

### **Bohrungsmerkmale**

50 m bis 440 m tiefe Bohrungen. Die 440 m langen Bohrungen sollen bis in eine Teufe von ca. 1.080 m verrohrt werden. Die Verrohrung soll später gezogen bzw. überbohrt werden. Dadurch wird der Bohrungsdurchmesser auf ca. 200 mm aufgeweitet. Da die östlichen Bohrungen von der Aufheizung durch die angrenzenden Einlagerungsfelder betroffen sein könnten, ist es vorgesehen, sie mit einem temperaturresistenten Material zu verfüllen. Ein entsprechender Baustoff wird im Rahmen einer Arbeitsgruppe, bestehend aus Mitarbeitern von BfS, BGR und DBE festgelegt.

Alle genannten Bohrungen befinden sich in dem Teil des Erkundungsbergwerkes, der mit feuchtem Salzgrus verfüllt wird und der durch Streckenverschlüsse vom Infrastrukturbereich getrennt wird. Erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten sind in diesem Teil des Grubengebäudes nur in der frühen Nachverschlussphase (wenige 1.000 Jahre) zu erwarten. Es sind nur geringe Lösungsmengen verfügbar (feuchter Salzgrus (0,6 Gew.-% Lösung) und Gebirgsfeuchte (0,02 %)). In der Bohrung 02YER02/RB233 ist ein begrenzter Lösungs- und Gaszutritt (ca. 48 m<sup>3</sup>) aus einer Hauptanhydrit-Scholle etwa 30 m unterhalb der 870 m-Sohle aufgetreten. Alle anderen Bohrungen weisen einen Abstand zu Hauptanhydrit-Schollen von wenigstens 30 m auf. Durch geophysikalische Vorerkundung wird gewährleistet, dass beim Durchbohren der Schwebe zwischen der 840 m- und der 870 m-Sohle keine Hauptanhydrit-Scholle angebohrt werden.

### **Beeinflussung von Einlagerungsfeldern (Abb. 4.4)**

Die Bohrung 02YER01RB641 (24 gon Neigung, Bohrort 5) schneidet das Niveau der 870 m-Sohle nördlich der Richtstrecke in Höhe des geplanten Einlagerungsfeldes Ost 12. Der minimale Abstand zur geplanten Richtstrecke beträgt 90 m. Der minimale Abstand der Bohrung zur nächsten geplanten Einlagerungsstrecke mit POLLUX 10 beträgt 65 m bzw. 80 m zu einem Einlagerungsbohrloch mit BSK 3 (vgl. /BOL 12/).

Da die Bohrung in Höhe des geplanten Einlagerungsfeldes einen Abstand von mindestens 50 m zur Richtstrecke aufweist, ist eine Verbindung zwischen einem Bohrloch mit erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten und der Richtstrecke – auch bei Annahme von Klüften, die im Hauptsalz eine max. bankrechte Mächtigkeit von 5 m haben können – nicht zu unterstellen.

Aufgrund des Abstandes zu den Einlagerungsstrecken / -bohrlöchern (> 64 m) ist eine Verbindung auszuschließen.

#### **Beeinflussung der nördlichen Richtstrecke (Abb. 4.4)**

- Die in westliche Richtung vom Bohrort 5 zu stoßende Bohrung 02YER01RB199 verläuft teilweise in einem Abstand von 15 m zur nördlichen Richtstrecke auf der geplanten Einlagerungssohle (Abb. 4.3). Zum Hauptanhydrit hält sie einen Abstand von über 40 m.

Bohrort 5.2: Die aus dem Bohrort zu stoßende vertikale Bohrung 02YER01RB205 verläuft 5 m neben der geplanten nördlichen Richtstrecke auf der 870 m-Sohle /BOL 12/. Der Abstand zum Hauptanhydrit beträgt über 40 m. Nach neusten Planungen wird auf diese Bohrung wahrscheinlich verzichtet.

Die Bohrungen verlaufen teilweise dicht an der vorgesehenen Richtstrecke Nord auf der 870 m-Sohle.

#### **Beeinflussung des westlichen Querschlags und der geplanten westlichen Einlagerungsfelder (Abb. 4.5)**

Bohrort 5.4 West: Die steil (80 gon) einfallende geplante Bohrung 02YEQ02/RB201 verläuft in 20 m Abstand zur Gabelung Richtstrecke Nord / Querschlag West

02YEQ02/RB 750, 02YEQ02RB751: 40 m Abstand zur Richtstrecke Nord

02YEQ02/RB 640: parallel zu Querschlag West, 25 m Abstand zur Verbindungsstrecke zu Schacht 1, 85 m Abstand zur geplanten Einlagerungskammer West 1, 190 m Abstand zur Einlagerungskammer West 2

Bohrort 1.2: 02YEQ02/RB198, minimaler Abstand zur Verbindungsstrecke zu Schacht 1: 15 m (in Höhe des Streckenverschlusses)

Die Bohrungen verlaufen im Hauptsalz und haben alle einen Abstand von über 150 m zu den Hauptanhydrit-Schollen. Zudem befinden sich die Bohrungen in dem Teil des Erkundungsbergwerks, der während der Nachverschlussphase mit Salzgrus verfüllt wird. Der Abstand zu den geplanten Einlagerungskammern des Westfeldes beträgt mindestens 85 m, Richtstrecken werden z. T. nur in 20 m Abstand (Bohrung 02YEQ02RB 201) passiert. Da die Bohrungen in dem Teil des Endlagers verlaufen, der nicht durch die wärmeentwickelnden Abfälle beeinflusst wird, sind Beeinträchtigungen der Sicherheitspfeiler um die Bohrungen durch thermomechanische Spannungen hier nicht zu unterstellen.

Zudem haben alle Bohrungen einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu den Grubenräumen auf der 870 m-Sohle.

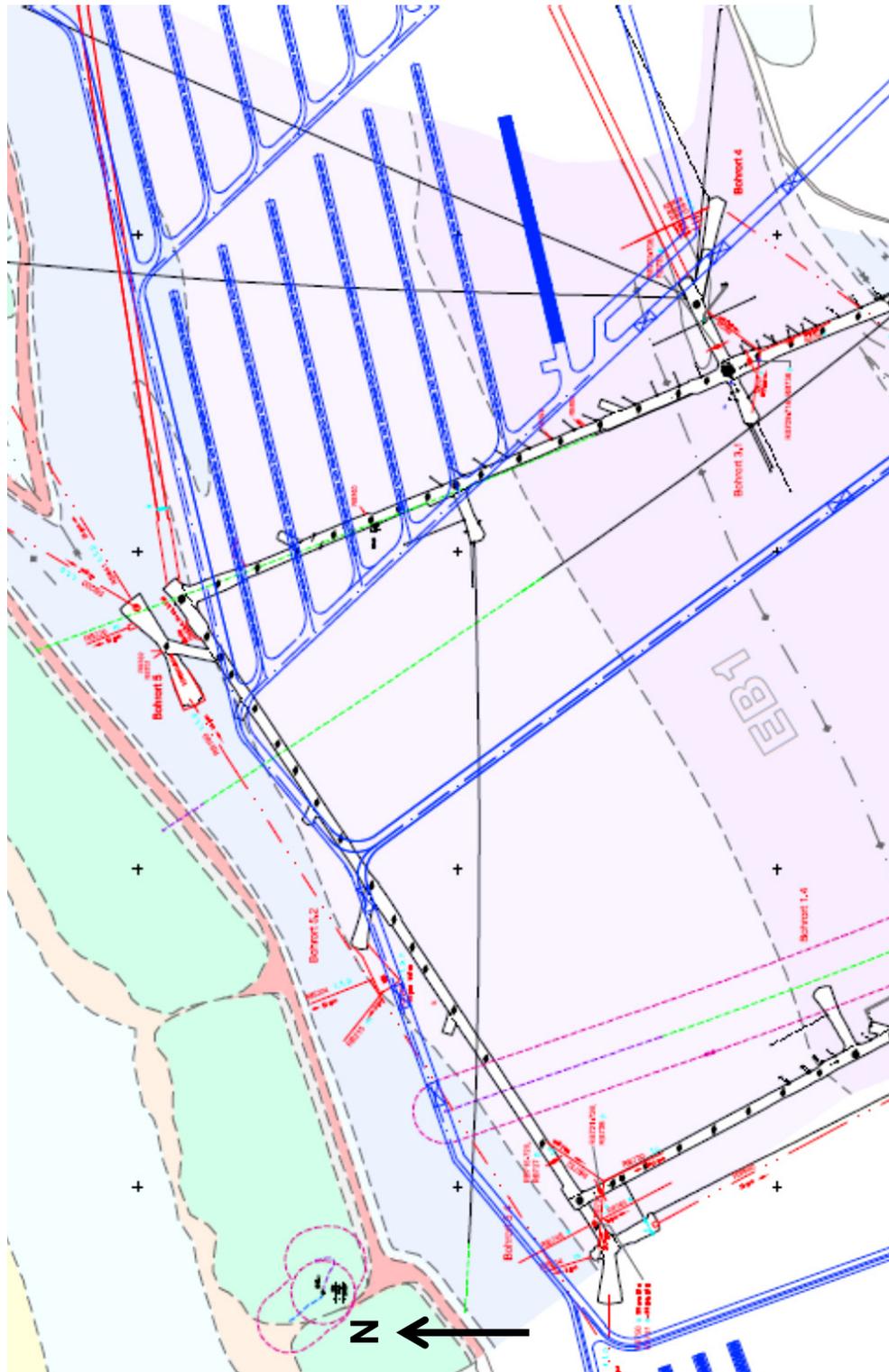
#### **Beeinflussung der Ost-Querschläge (Abb. 4.5)**

Bohrort 3: RB816: 130 m Abstand zum geplanten Querschlag 2 Ost auf der 870 m-Sohle

RB195: 23 m Abstand zum Querschlag 1 Ost im Bereich des Streckenverschlusses

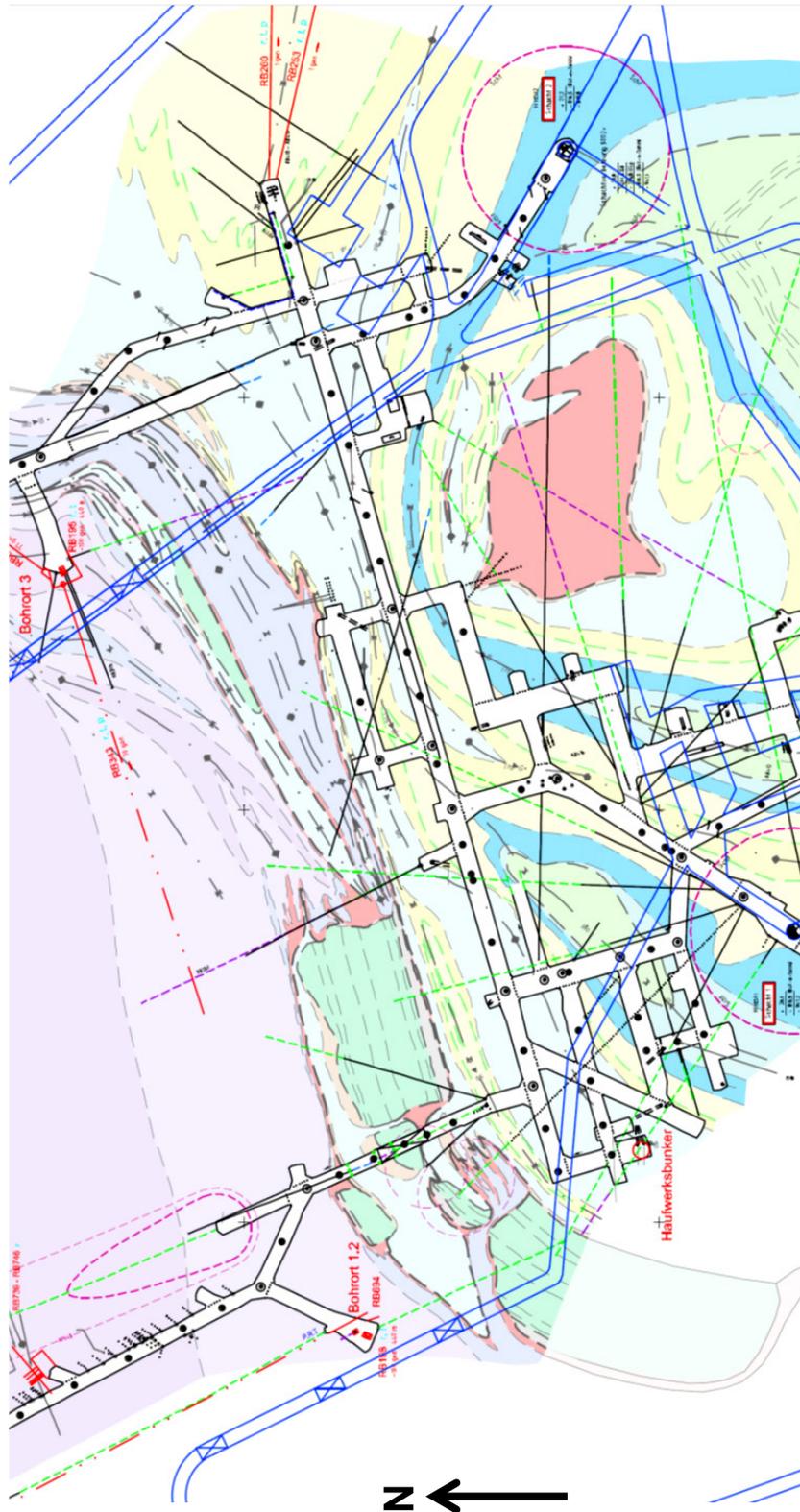
RB343: 13 m Abstand zum Querschlag 1 Ost im Bereich des Streckenverschlusses

Die genannten Bohrungen befinden sich in Bereichen des Grubengebäudes im Hauptsalz, die während der Nachverschlussphase mit Salzgrus verfüllt werden, und haben einen Abstand von ca. 60 bzw. 70 m zu den nächsten Hauptanhydrit-Schollen.



**Abb. 4.4** Kombinierte Darstellung des Sohlenrisses der 840 m-Sohle

mit dem Nord-Teil des EB1 (schwarze Grubengebäude), den Planungen für den EB3 (rot) und den geplanten Erkundungsbohrungen (rot) (Stand: 5.3.2012) sowie einem Ausschnitt aus der Grubengebäudeplanung für die Einlagerungsvariante AB1 (870 m-Sohle) (blau) /BOL 12/



**Abb. 4.5** Kombinierte Darstellung des Sohlenrisses der 840 m-Sohle

mit dem Süd-Teil des EB1 (schwarze Grubengebäude) und den geplanten Erkundungsbohrungen (rot) (Stand: 5.3.2012) sowie einem Ausschnitt aus der Grubengebäudeplanung für die Einlagerungsvariante AB1 (870 m-Sohle) (blau) /BOL 12/

## 5 Zusammenfassung

Zur Erkundung des Deckgebirges sowie der Wirtsgesteinszusammensetzung und Wirtsgesteinseigenschaften sowie seiner Internstrukturen sind neben dem Einsatz von geophysikalischen Untersuchungsverfahren (Seismik, EMR-Messungen) übertägige und untertägige Erkundungsbohrungen erforderlich. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit könnten diese Bohrungen – falls ihre Verfüllungen eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit aufweisen – die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen. Eine derartige Entwicklung ist aufgrund der qualitätsgesicherten Verfüllung der Bohrungen wenig wahrscheinlich, aber z. B. durch Fehler bei der Erstellung der Verfüllung nicht völlig auszuschließen. Bei der Bewertung eventueller Wegsamkeiten in den Bohrungen ist zu berücksichtigen, dass diese aufgrund der Kriecheigenschaften des Salzes nur begrenzte Zeit wirksam wären.

Die übertägigen Bohrungen umfassen hydrogeologische Bohrungen, Salzspiegelbohrungen und Tiefbohrungen. Alle übertägigen Bohrungen reichen nicht in die im Rahmen von VSG geplanten Einlagerungsbereiche.

Die hydrogeologischen Bohrungen schließen nur das Deckgebirge auf. Bei nicht sachgerechtem Verschluss können die hydrogeologischen Bohrungen auf die Grundwasserhältnisse im Deck- und Nebengebirge hydraulische Auswirkungen haben, indem sie Grundwasserstockwerke verbinden, die unter natürlichen Bedingungen voneinander isoliert, d. h. durch geringdurchlässige Schichten getrennt gewesen wären.

Salzspiegelbohrungen reichen bis zu 230 m tief in das Wirtsgestein. Der Abstand zum geplanten Einlagerungsniveau beträgt 385 m. Die Tiefbohrungen durchdringen das Niveau der Einlagerungssohle und reichen rund 2.000 m tief. Da sie aber an den Flanken des Salzstocks angeordnet sind, sind die in der VSG geplanten Einlagerungsbereiche davon nicht betroffen. Im Niveau der 870 m-Sohle stehen alle Tiefbohrungen in Schichten der Leine-Folge. Im Gegensatz zu den beiden, mehrere hundert Meter vom geplanten Grubengebäude entfernten Tiefbohrungen an der SE-Flanke (Go 1004 und Go 1005) befinden sich die zwei an der NW-Flanke abgeteufte Tiefbohrungen (Go 1002, Go 1003) in 100 bzw. 150 m Abstand zum vorgesehenen Grubengebäude.

Die untertägigen Bohrungen umfassen Bohrungen auf der Erkundungssohle sowie stärker geneigte Bohrungen, die von der Erkundungssohle bis zur Einlagerungssohle reichen.

Die flach geneigten Erkundungsbohrungen verlaufen überwiegend im Bereich der 840 m-Sohle bzw. in der Schwebelage zwischen der 840 m- und der 870 m-Sohle. Da die Sohlen gemäß dem Verschlusskonzept – abgesehen von den Schächten – während der Nachverschlussphase komplett getrennt sind, ist die Relevanz dieser Bohrungen für den Langzeitsicherheitsnachweis gering.

Insgesamt 14 z. T. stark geneigte Erkundungsbohrungen, die die potenzielle Einlagerungssohle erreichen, wurden im Bereich des EB1 bis 2001 gebohrt, 13 weitere Bohrungen sind im Zuge der Erkundung 2012 / 2013 vorgesehen. Die Existenz dieser Bohrungen wurde bei der Endlagerplanung dahingehend berücksichtigt, dass unterhalb des EB1 kein Einlagerungsbereich vorgesehen ist. In anderen, zukünftig aufzufahrenden Erkundungsbereichen sind vor allem Untersuchungen auf der Erkundungssohle bzw. bis auf die Einlagerungssohle reichende Untersuchungen der Randbereiche zum Hauptanhydrit / Carnallit, aber keine Erkundungsbohrungen in die Pfeiler potenzieller Einlagerungsbereiche vorgesehen.

Von den im Infrastrukturbereich abgeteuften Erkundungsbohrungen verläuft die Bohrung 01YEF20/RB217 in 6 m Abstand zu einer Strecke auf der 870 m-Sohle. Eine zweite Bohrung 02YEA04/RB023 ist unvollständig verfüllt und wies während des Bohrvorganges Lösungs- und Gaszutritte auf. Die Bohrung weist einen Abstand von 15 m zur geplanten Strecke auf der 870 m-Sohle auf.

Zur Untersuchung des potenziellen Einlagerungsbereiches und zur Bestimmung der Grenze zwischen Staßfurt-/Leine-Folge wurden 8 z. T. stark geneigte Bohrungen abgeteuft und 10 weitere Bohrungen sind vorgesehen. Alle Bohrungen befinden sich in dem Teil des Erkundungsbergwerks, der während der Nachverschlussphase mit Salzgrus verfüllt und durch Streckenverschlüsse vom Infrastrukturbereich getrennt wird, und sich im „trockenen“ Bereich des Hauptsalzes (Gebirgsfeuchte 0,02 Vol.-%) befindet. Der Abstand zu den Hauptanhydrit-Schollen beträgt mindestens 30 m.

Die Bohrungen am NE-Rand haben einen minimalen Abstand von der Richtstrecke auf der 870 m-Sohle von 50 m und von der nächsten Einlagerungsstrecke von 65 m.

Die Bohrungen RB199 und RB205 (entfällt wahrscheinlich) verlaufen teilweise nur in 15 bzw. 5 m Abstand zur geplanten nördlichen Richtstrecke auf der 870 m-Sohle. Zum Hauptanhydrit besteht aber ein Abstand von mindestens 30 m. Die Ansatz- und Endpunkte der Bohrungen stehen in später verfüllten Bereichen des Grubengebäudes.

Im westlichen Teil, der für Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vorgesehen ist, sind ebenfalls mehrere Erkundungsbohrungen vorgesehen, die z. T. nur 20 m Abstand zum Querschlag W (RB201) bzw. 15 m zur Verbindungsstrecke zum Schacht 1 (im Bereich eines Streckenverschlusses, RB198) haben. Der Abstand der Bohrungen zu potenziell lösungsführenden Gesteinen beträgt aber über 100 m. Zudem befinden sich die Ansatz- und Endpunkte der Bohrungen in später verfüllten Bereichen des Grubengebäudes.

Im Bereich der östlichen Querschläge verlaufen zwei Bohrungen in Abständen von 13 m bzw. 23 m zum Querschlag 1 Ost im Bereich des Streckenverschlusses. Die genannten Bohrungen stehen in den Bereichen des Grubengebäudes im Hauptsalz, der während der Nachverschlussphase mit Salzgrus verfüllt wird, und weisen einen Abstand von 57 bzw. 70 m zu benachbarten Hauptanhydrit-Schollen auf.

Zusammenfassend weisen alle übertägigen Erkundungsbohrungen einen Abstand von mehreren 100 Metern zum vorgesehenen Grubengebäude des Endlagers auf. Bei den untertägigen, geneigten Erkundungsbohrungen wurden mehrere Bohrungen identifiziert, die relativ dicht an geplanten Grubenräumen auf der 870 m-Sohle verlaufen.

Falls eine spätere Bewertung ergibt, dass hieraus Sicherheitsprobleme resultieren könnten, so besteht bei der weiteren Optimierung des Endlagerkonzeptes die Möglichkeit, durch geeignete Streckenführung auf der 870 m-Sohle ausreichende Sicherheitspfeiler zu den Erkundungsbohrungen einzuhalten ..

## Literaturverzeichnis

- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /GLÄ 02/ Gläß, F., Mohlfeld, M.: ERA Morsleben: Kriterien für das Verfüllen von Bohrungen. In: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, Unterlage Nr. P 145, Rev. 01, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 2002.
- /HAM 12/ Hammer, J., Pusch, M., Häger, A., Ostertag-Henning, C., Schlömer, S., Mingerzahn, G., Scheeder, G., Shao, H., Paul, B., Schulze, O., Zaretzki, B., Hesser, J.: Projekt Gorleben, Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben. 9GE332300000, 236 Seiten, Zwischenbericht 2011, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Hannover, 2012.
- /KÖS 02/ Köster, R., Kaufmann, M., Laske, D.: ERA Morsleben: Systembeschreibung und Qualitätssicherungskonzept Bohrlochverfüllung mit Magnesiabinder. In: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, Unterlage Nr. G 148, Rev. 00, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 2002.

/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.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Positionen der übertägigen Erkundungsbohrungen im Umfeld des Salzstocks Gorleben (Abbildung BGR) .....	10
Abb. 4.1	Erkundungsbohrungen auf der 840 m-Sohle (Nord-Teil des EB1) .....	13
Abb. 4.2	Erkundungsbohrungen auf der 840 m-Sohle (Süd-Teil des EB1).....	14
Abb. 4.3	3D-Darstellung des Grubengebäudes mit den geplanten Erkundungsbohrungen (Ersteller: DBE) .....	19
Abb. 4.4	Kombinierte Darstellung des Sohlenrisses der 840 m-Sohle.....	23
Abb. 4.5	Kombinierte Darstellung des Sohlenrisses der 840 m-Sohle.....	24