

**Überprüfung und Bewertung
des Instrumentariums für eine
sicherheitliche Bewertung
von Endlagern für HAW**

ISIBEL

**Entwicklung und Test einer Methodik
zur Ableitung eines Referenzszenarios**

GRS BGR DBE TEC

**Überprüfung und Bewertung
des Instrumentariums für eine
sicherheitliche Bewertung
von Endlagern für HAW**

ISIBEL

**Entwicklung und Test einer Methodik
zur Ableitung eines Referenzszenarios**

Dokumentenkennzeichen XXX

Rev.	Datum	eigene Nr.	Grund / Beschreibung

	geprüft:	/.....	/.....
	Dr. Krone	Dr. Weber	Dr. Mönig

227 Seiten

April 2010

D. Buhmann
J. Mönig
J. Wolf

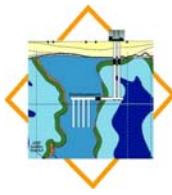
**Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) mbH**

S. Keller
S. Mrugalla
J. R. Weber

**Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)**

J. Krone
A. Lommerzheim

DBE TECHNOLOGY GmbH



Vorwort

Im Rahmen des Projektes ISIBEL wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsformation Salzgestein entwickelt. Dabei wurde untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Das Vorhaben wurde in zwei Projektphasen abgewickelt: Phase I im Zeitraum 01.10.2005 bis 31.12.2007 und Phase II im Zeitraum 01.01.2008 bis 31.03.2010. Die Ergebnisse beider Phasen wurden jeweils zu deren Abschluss in einer Reihe von Berichten veröffentlicht, die nachfolgend aufgeführt sind.

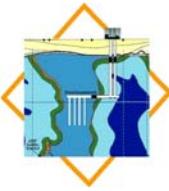
Berichte der Phase I

Zusammenfassender Bericht Phase I

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, April 2008.

Einzelberichte zu den verschiedenen Arbeitspaketen

1. Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 11614/05, Juli 2007.
2. Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
3. Bewertung der Betriebssicherheit. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
4. FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08, Februar 2008.
5. Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007.
6. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
7. Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS Braunschweig, Bericht GRS-233, April 2008.



8. Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
9. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008.

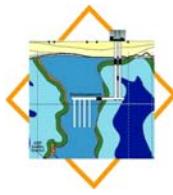
Berichte der Phase II

Zusammenfassender Abschlussbericht für die Phasen I und II

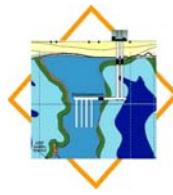
Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Abschlussbericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

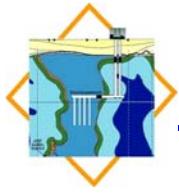
Einzelberichte zu den verschiedenen Arbeitspaketen der Phase II

10. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Revision 01. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010,
11. Erläuterungen zur Revision des FEP-Kataloges. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
12. Entwicklung und Test einer Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
13. Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
14. Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzgesteinen. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
15. Vorgehensweise bei einem Safety-Case-Konzept für ein HAW-Endlager im Salinar. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

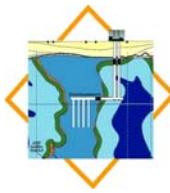


Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages von der BGR sowie, vertreten durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), unter den Förderkennzeichen 02E10055 und 02E10065 von der GRS bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

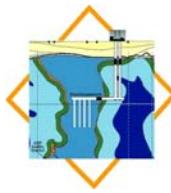




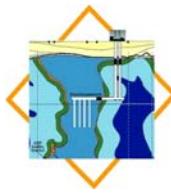
1	Einleitung	15
2	Methodik.....	16
3	Prämissen bei der Ableitung der FEP-Ausprägungen für das Referenzszenario.....	33
4	Beschreibung der FEP-Ausprägungen	36
4.1	FEP Erosion (1.2.07.01)	36
4.1.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	36
4.1.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	40
4.1.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Erosion (1.2.07.01)	44
4.2	FEP Subrosion (1.2.09.02)	46
4.2.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	46
4.2.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	47
4.2.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Subrosion (1.2.09.02)	52
4.3	FEP Permafrost (1.3.04.01).....	54
4.3.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	54
4.3.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	55
4.3.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Permafrost (1.3.04.01).....	56
4.4	FEP Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)	58
4.4.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	58
4.4.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	59
4.4.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)	59



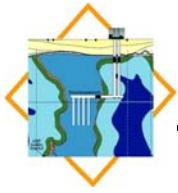
4.5	FEP Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)	60
4.5.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	60
4.5.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	61
4.5.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)	70
4.6	FEP Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)	73
4.6.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	73
4.6.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	73
4.6.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)	80
4.7	FEP Konvergenz (2.1.07.01)	83
4.7.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	83
4.7.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	84
4.7.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Konvergenz (2.1.07.01)	99
4.8	FEP Fluiddruck (2.1.07.03).....	103
4.8.1	Auslösende FEPs für Fluiddruck (1. Ebene)	103
4.8.2	Beeinflussende FEPs für Fluiddruck (1. Ebene)	103
4.8.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Fluiddruck (2.1.07.03)	113
4.9	FEP Rissbildung (2.1.07.06)	117
4.9.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	117
4.9.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	117
4.9.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Rissbildung (2.1.07.06)	126
4.10	FEP Absinken der Abfallbehälter (2.1.07.09)	129
4.10.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	129
4.10.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	129
4.10.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Absinken der Abfallbehälter (2.1.07.09)	134



4.11	FEP Quellen des Bentonits (2.1.08.08.)	136
4.11.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	136
4.11.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	137
4.11.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Quellen des Bentonits (2.1.08.08)	148
4.12	FEP Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)	152
4.12.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	152
4.12.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	153
4.12.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)	157
4.13	FEP Metallkorrosion (2.1.09.03)	159
4.13.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	159
4.13.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	160
4.13.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Metallkorrosion (2.1.09.03)	165
4.14	FEP Imprägnierung (2.1.12.06)	167
4.14.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	167
4.14.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	167
4.14.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Imprägnierung (2.1.12.06)	169
4.15	FEP Auflockerungszone (2.2.01.01)	170
4.15.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	170
4.15.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	172
4.15.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Auflockerungszone (2.2.01.01)	178
4.16	FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)	180
4.16.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	180
4.16.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene)	182
4.16.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)	190



4.17	FEP Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03).....	194
4.17.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	194
4.17.2	Beeinflussende FEPs (1. Ebene).....	196
4.17.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03).....	198
4.18	FEP Feststoffgebundener Radionuklidtransport (3.2.08.01)	200
4.18.1	Auslösende FEPs (1. Ebene)	200
4.18.2	Beeinflussende FEPs (1.Ebene).....	202
4.18.3	Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Feststoffgebundener Radionuklidtransport (3.2.08.01)	202
5	Beschreibung des abgeleiteten Referenzszenarios.....	204
5.1	Nahfeld.....	204
5.2	Strecken und Schächte	209
5.3	Wirtsgestein.....	217
5.4	Deck- und Nebengebirge	223
6	Diskussion und Ausblick.....	225
7	Literaturverzeichnis	227

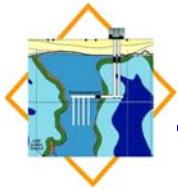


1. Einleitung

Das Projekt ISIBEL (Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine **sicherheitliche Bewertung von HAW-Endlagern**, FKZ 02E 10055 und 02E 10065) hat die kritische Be-standsauftnahme der für die Durchführung eines Sicherheitsnachweises benötigten und vorhandenen Argumente, Konzepte und Methoden zum Inhalt. Im Arbeitspaket 2 der laufenden Phase 2 des Vorhabens sind die Arbeiten zur Methodik einer Szenarienentwicklung und –analyse verankert.

Die Entwicklung und Analyse von Szenarien als Bestandteil eines Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz ist auf Grundlage des Endlagerkonzeptes und der Standortgegebenheiten durchzuführen. Die Szenarien bilden die mit Ungewissheiten behaf-tete Entwicklung des Endlagersystems für den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre, ab Verschluss des Endlagers. Im Rahmen des Referenzszenarios wird eine möglichst große Gesamtheit von als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des Endlagersystems be-schrieben. Wenig wahrscheinliche Entwicklungen werden mit Hilfe von Alternativszenarien dargestellt. Zusammengenommen sollen die Szenarien die Ungewissheiten in der Entwick-lung inhaltlich abdecken.

Der Bericht beschreibt die Methodik und die Ableitung des Referenzszenarios auf Basis der FEPs (features, events, processes), die durch das ISIBEL-Projekt Phase 1 (Laufzeit bis Ende 2008) katalogisiert und in einer Datenbank organisiert wurden. In der Phase 2 des Projekts wurde diese Datenbank vom ISIBEL-Team unter Berücksichtigung der Anmerkun-gen eines externen Review-Teams überarbeitet. Parallel zu diesen Arbeiten wurde das vorliegende Referenzszenario abgeleitet, in das einige Ergebnisse der Überarbeitung eingingen, um die inhaltlich gute Qualität zu gewährleisten. Aus diesem Grund ergeben sich Abweichungen zu den Inhalten der ersten Version des FEP-Kataloges.



2. Methodik

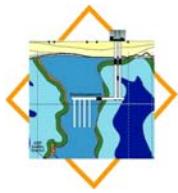
Ausgangspunkt für die Entwicklung der Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios ist die im Projekt ISIBEL Phase 2 erarbeitete folgende Definition für das Referenzszenario.

“Das Referenzszenario wird vom Verfasser des Sicherheitsnachweises festgelegt und beschreibt abdeckend im Hinblick auf die Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen eine möglichst große Gesamtheit von als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des Endlagersystems.“

Die nötigen Informationen für die als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des Endlagersystems liefern die FEPs, die für den Test der Methodik aus dem FEP-Katalog Version 1 (BUHMANN, D., EBERTH, S. et al. 2008) stammen. Als erstes Selektionskriterium für die im Referenzszenario zu berücksichtigenden FEPs wurden entsprechend der obigen Definition solche Ereignisse und Prozesse als Bestandteile ermittelt, deren bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit als „wahrscheinlich“ eingestuft wurde. Aus diesen FEPs wurden anschließend die selektiert, die direkt die Funktion von einschlusswirksamen Barrieren (**ewB**) beeinträchtigen und somit relevant für die Sicherheitsfunktionen sind. Als ewB des Endlagersystems gelten die „Strecken- und Schachtverschlüsse“, das „Wirtsgestein“ und basierend auf der Version 1 des FEP-Kataloges auch die „Behälter“.

Das Endlagersystem beinhaltet zahlreiche Komponenten mit unterschiedlichen Eigenschaften. In diesem System wirken die selektierten FEPs z. T. nur an bestimmten Stellen und auch die Art und Intensität ihrer Ausprägung kann räumlich variieren. Um trotz dieser komplexen Rahmenbedingungen die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems verständlich beschreiben zu können, wurde es in vier Teilsysteme gegliedert. Die zu berücksichtigenden Teilsysteme sind das „Nahfeld“, die „Strecken und Schächte“, das „Wirtsgestein“ sowie das „Deck- und Nebengebirge“. Sie werden auch im FEP-Katalog als Sortierkriterium verwendet.

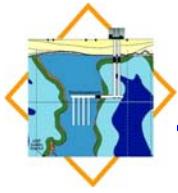
FEPs, die den vorher genannten Vorgaben („wahrscheinlich“, „direkt“) im FEP-Katalog genügen, sind in nachfolgender Tabelle 1 zusammen mit den Teilsystemen, in denen sie wirken, aufgelistet. Sie stellen die Basis für die Inhalte und Beschreibung des Referenzszenarios dar.



Tab. 1: Für das Referenzszenario zu berücksichtigende FEPs mit **wahrscheinlichen** und **direkten** Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren.

Salzstock externe Phänomene:		
FEP Nummer	FEP Titel	Teilsysteme
1.2.07.01	Erosion	S, D
1.2.09.02	Subrosion	W
1.3.04.01	Permafrost	W, S, D
1.3.05.02	Vollständige Inlandvereisung	W, S, D

Salzstock interne Phänomene:		
FEP Nummer	FEP Titel	Teilsysteme
2.1.05.02	Eigenschaften von Verschlussmaterialien	S
2.1.05.03	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	S
2.1.07.01	Konvergenz	W, S, N
2.1.07.03	Fluiddruck	W, S, N
2.1.07.06	Rissbildung	W, S
2.1.07.09	Absinken der Abfallbehälter	W,
2.1.08.08	Quellen des Bentonits	W, S
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	W, S, D
2.1.09.03	Metallkorrosion	S, N
2.1.12.06	Imprägnierung	W
2.2.01.01	Auflockerungszone	S, N
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	W, S, N
2.2.10.03	Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	W
3.2.08.01	Feststoffgebundener Radionuklidtransport	W, N



Die bloße Benennung und Berücksichtigung der Inhalte von wahrscheinlichen und direkt auf die Funktion der ewB einwirkenden FEPs ist für die Beschreibung des Referenzszenarios nicht ausreichend. Es muss auch dargelegt werden, welche Relevanz ein FEP für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems besitzt bzw. wie seine Ausprägung und damit die Intensität des FEP-Wirkens ausgebildet sind. Nur ein deutlich ausgeprägtes FEP entfaltet seine Wirksamkeit auf die langzeitliche Entwicklung von Barrieren des Endlagersystems und ist bei den Langzeitsicherheitsbetrachtungen mit den sich daraus ergebenden Konsequenzen zu diskutieren.

Die Ableitung von Ausprägungen ist über die im FEP-Katalog angegebenen Abhängigkeiten von „auslösenden“ und „beeinflussenden“ FEPs möglich. Für die Beschreibung der diskutierten FEP-Ausprägungen werden im Rahmen des Referenzszenarios die direkten und indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB gleichrangig behandelt.

Methodisch wurden die Abhängigkeiten zwischen den FEPs in Ebenen aufgeteilt. Alle im Referenzszenario zu berücksichtigenden FEPs und deren Abhängigkeiten bis in die 2. Ebene sind in Tabelle 2 aufgelistet und werden in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

Die Aufteilung in Ebenen folgte der Wirkhierarchie, wobei auslösende und beeinflussende FEPs der sogenannten 1. Ebene die Ausprägung eines im Referenzszenario zu berücksichtigenden FEPs verursachen. Die FEPs der 1. Ebene können entsprechend durch andere ausgelöst bzw. beeinflusst werden, die dann die 2. Ebene bilden (vgl. Abb. 1 und Tab. 2). Dabei können die auslösenden FEPs der 2. Ebene für die auslösenden der 1. Ebene wichtig werden, wenn sie deren Auswirkungen intensivieren. Die auslösenden FEPs der 1. Ebene werden auch durch beeinflussende der 2. Ebene geprägt, so dass sich über diese Beeinflussung die Ausprägung des auslösenden FEP ändern kann, welches sich wiederum auf das jeweils diskutierte FEP in entsprechender Weise auswirkt.

Eine Selektion von FEPs über die zweite Ebene hinaus hat sich als unnötig erwiesen, da bei den dort ausgewählten FEPs keine neuen hinzukommen. Es ergeben sich in den weiteren Ebenen nur andere Verknüpfungen zwischen den bereits selektierten FEPs, wobei sich keine neuen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems ableiten.

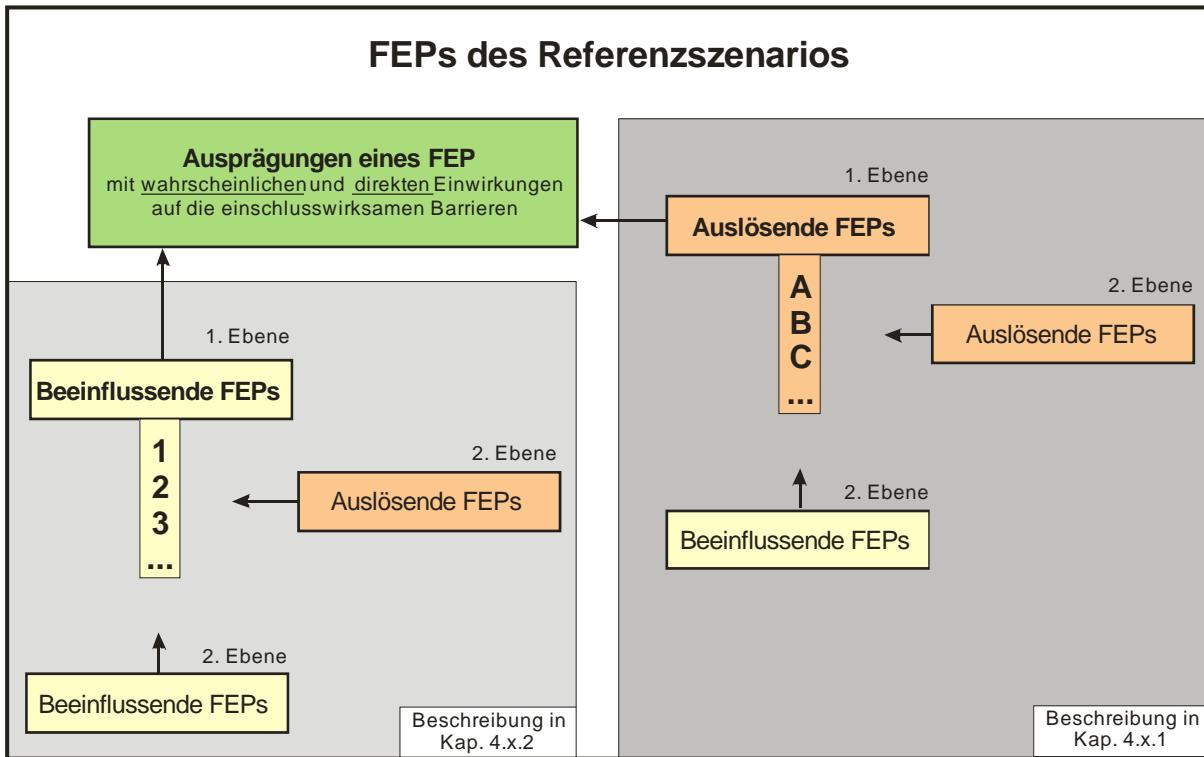
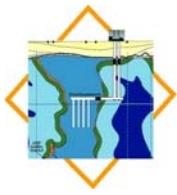


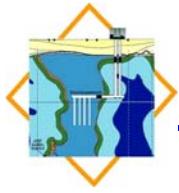
Abb. 1: Schema zur Bestimmung von FEP-Ausprägungen auf Basis von auslösenden und beeinflussenden FEPs.

Die in Abbildung 1 gewählten Farben für das im Referenzszenario zu berücksichtigende FEP (grün), die Auslösenden FEPs (orange) und die Beeinflussenden FEPs (gelb) werden in Tabelle 2 und in den Abbildungen in Kapitel 4 in gleicher Weise verwendet.

Inhaltlich werden die FEP-Ausprägungen in Kapitel 4 beschrieben. Jedes FEP wird dabei, wie nachfolgend aufgelistet, in drei Unterkapitel strukturiert.

1. Beschreibung der auslösenden FEPs (1. Ebene) und Nennung der auslösenden und beeinflussenden FEPs der 2. Ebene.
 2. Beschreibung der beeinflussenden FEPs (1. Ebene) und Nennung der auslösenden und beeinflussenden FEPs der 2. Ebene.
 3. Zusammenfassende Beschreibung der FEP- Ausprägungen abgeleitet aus den Abhängigkeiten von maßgeblichen auslösenden und beeinflussenden FEPs.

Die inhaltlichen Beschreibungen der FEPs enthalten auch Angaben zum Zeitrahmen, in dem das FEP wirkt. Gründe dafür, dass einige FEPs nur in bestimmten Zeiten wirken, sind z. B.

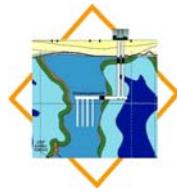


dass sie an spezielle Rahmenbedingungen gebunden sind. Solche Bedingungen können die durch die eingelagerten Abfälle verursachte und nur in den ersten 10.000 Jahren wirksame Aufheizung und Abkühlung des Gebirges sein oder später ab ca. 50.000 Jahren durch den Beginn einer neuen Kaltzeit entstehen. Letztere geht mit der Bildung von Permafrost und einer nachfolgenden Inlandvereisung einher.

Die im Unterkapitel „**Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP ...**“ gemachten Angaben sind neben räumlichen und zeitlichen Aspekten der FEP-Wirkungsweise von wesentlicher Bedeutung für die Formulierung des Referenzszenarios.

Abschließend ist zu bemerken, dass während der Ableitung des Referenzszenarios Widersprüche im FEP-Katalog Version 1 aufgedeckt wurden und dass parallel zu diesen Arbeiten ein Review des Kataloges durch externe Gutachter Lux, K.-H., RÖHLIG, K.-J. et al. (2009) stattfand. Widersprüche oder inhaltliche Mängel, die sich in den FEP Beschreibungen befanden, wurden bei den Beschreibungen in Kapitel 4 korrigiert, auch wenn dadurch Abweichungen zum FEP-Katalog Version 1 entstanden. Bemerkungen zu FEPs, bei denen es sich zumeist um das Weglassen oder Zusammenführen von bestimmten FEPs in der Version 2 des FEP-Kataloges handelt, sind in *Kursivschrift* eingefügt.

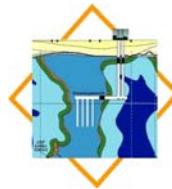
Aufgrund des Gutachter-Reviews und der Überarbeitung der Version 1 des FEP-Kataloges durch das ISIBEL-Team ändern sich die Grundlagen für die Ableitung eines zukünftig zu überarbeitenden Referenzszenarios, insbesondere auch in der Auflistung von „auslösenden“ und „beeinflussenden“ FEPs in den Abhängigkeitsfeldern. Das methodische Vorgehen bleibt aber bei der Erstellung des Referenzszenarios unberührt.



2 Methodik

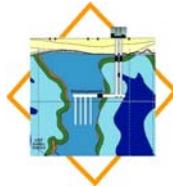
Tab. 2: Für das Referenzszenario zu berücksichtigende FEPs mit **wahrscheinlichen** und **direkten** Einwirkungen auf die ewB sowie ihre Abhängigkeiten von **auslösenden** und **beeinflussenden** wahrscheinlichen FEPs.

FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
1.2.07.01 Erosion	A.) Transgression/Regression	Globale klimatische Veränderungen				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge , 2.) Globale klimatische Veränderungen, 3.) Veränderung des Ökosystems aufgrund Klimawandel, 4.) Menschlicher Einfluss auf das Klima, 5.) Topographie und Morphologie, 6.) Oberflächengewässer, 7.) Maritime Bedingungen	Beeinflusst durch (2. Ebene): Keine identifiziert					
	B.) Permafrost	Globale klimatische Veränderungen				
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Vollständige Inlandvereisung, Oberflächengewässer					
	C.) Inlandvereisung in randlicher Lage	Globale klimatische Veränderungen				
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Keine identifiziert					
	D.) Vollständige Inlandvereisung	Globale klimatische Veränderungen				
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Keine identifiziert					



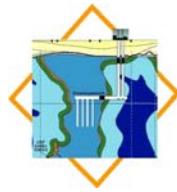
2 Methodik

FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
1.2.09.02 Subrosion	A.) Geosphäre: Grundwasserströmung	Deck- und Nebengebirge				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Diapirismus, 2.) Permafrost, 3.) Hydrogeologische Veränderungen aufgrund Klimawandels, 4.) Wirtsgestein, 5.) Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge, 6.) Temperaturänderung am Salzspiegel	Beeinflusst durch (2. Ebene): Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge, Globale klimatische Veränderungen, Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, Vollständige Inlandvereisung, Hydrogeologische Veränderungen aufgrund Klimawandels, Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen, Permeabilität, Störungen und Störungszonen, Geosphäre: Eigenschaften der Transportpfade, Hydrochemische Verhältnisse im Deck- u. Nebengebirge, Topographie und Morphologie, Aquifere, Oberflächengewässer, Maritime Bedingungen				zu berücksichtigen	
1.3.04.01 Permafrost	A.) Globale klimatische Veränderungen	Menschlicher Einfluss auf das Klima		zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Vollständige Inlandvereisung, 2.) Oberflächengewässer	Beeinflusst durch (2. Ebene): Keine identifiziert					
1.3.05.02 Vollständige Inlandvereisung	A.) Globale klimatische Veränderungen	Menschlicher Einfluss auf das Klima		zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen
Beeinflusst durch (1. Ebene): Keine identifiziert	Beeinflusst durch (2. Ebene): Keine identifiziert					



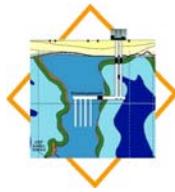
2 Methodik

FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
2.1.05.02 Eigenschaften von Verschlussmaterialien	A.) Zusammensetzung des Verschlussmaterials	—				
Beeinflusst durch (1. Ebene): <ol style="list-style-type: none">1.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen,2.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- o. Schachtverschlusses,3.) Konvergenz,4.) Lösungen im Grubenbau,5.) Quellen des Bentonits,6.) Auflösung und Ausfällung7.) Thermische Expansion und Kontraktion,8.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Beeinflusst durch (2. Ebene): Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses, Auflösung und Ausfällung		zu berücksichtigen			
2.1.05.03 Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	—					
Beeinflusst durch (1. Ebene): <ol style="list-style-type: none">1.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien,2.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses,3.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien,4.) Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren,5.) Geochemisches Milieu im Grubenbau,6.) Auflösung und Ausfällung				zu berücksichtigen		

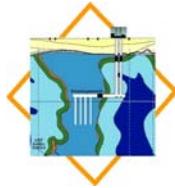


2 Methodik

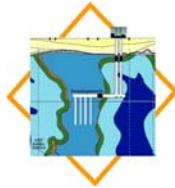
FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
2.1.07.01 Konvergenz	A.) Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen	Auffahrung der Grube				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Auffahrung der Grube, 2.) Grubengebäude, 3.) Erosion, 4.) Sedimentation, 5.) Permafrost, 6.) Vollständige Inlandvereisung, 7.) Versatz: Eigenschaften des Materials, 8.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien, 9.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, 10.) Fluiddruck, 11.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, 12.) Quellen des Bentonits, 13.) Thermische Expansion und Kontraktion, 14.) Auflockerungszone, 15.) Deck- und Nebengebirge, 16.) Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein, 17.) Maritime Bedingungen	Beeinflusst durch (2. Ebene): Einlagerungsgeometrie und -abfolge, Vollständige Inlandvereisung, Eigenschaften der Behälter, Versatz: Eigenschaften des Materials, Eigenschaften von Verschlussmaterialien, Versatzkompaktion, Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses, Quellen des Bentonits, Thermische Expansion und Kontraktion, Wirtsgestein	Fluiddruck	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	



EP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
2.1.07.03 Fluiddruck	—					
Beeinflusst durch (1. Ebene): <ul style="list-style-type: none">1.) Konvergenz (s. Kap. 4.8.2),2.) Versatzkompaktion,3.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien,4.) Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses,5.) Lösungen im Grubenbau,6.) Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren,7.) Lösungszutritt in Grubenbaue,8.) Geochemisches Milieu im Grubenbau,9.) Thermische Expansion und Kontraktion,10.) Verdampfen von Wasser,11.) Gasmenge im Grubenbau,12.) Gasvolumen,13.) Imprägnierung			zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	
2.1.07.06 Rissbildung	—					
Beeinflusst durch (1. Ebene): <ul style="list-style-type: none">1.) Permafrost,2.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien,3.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen,4.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses,				zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	

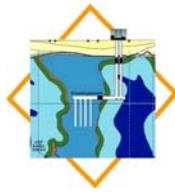


EP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
5.) Konvergenz, 6.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, 7.) Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses, 8.) Lageverschiebung des Schachtverschlusses, 9.) Thermische Expansion und Kontraktion, 10.) Auflockerungszone, 11.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, 12.) Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein				zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	
2.1.07.09 Absinken der Abfallbehälter	—					
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Einlagerungsgeometrie und -abfolge, 2.) Eigenschaften der Behälter, 3.) Konvergenz, 4.) Wirtsgestein, 5.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung			zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	



2 Methodik

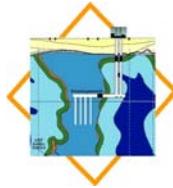
FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
2.1.08.08 Quellen des Bentonits	A.) Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren	—				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Permafrost, 2.) Zusammensetzung des Verschlussmaterials, 3.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien, 4.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, 5.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses, 6.) Konvergenz, 7.) Fluiddruck, 8.) Geochemisches Milieu im Grubenbau, 9.) Wärmeproduktion, 10.) Thermische Expansion und Kontraktion, 11.) Auflockerungszone, 12.) Fluidvorkommen im Wirtsgestein	Beeinflusst durch (2. Ebene): Versatz: Eigenschaften des Materials, Eigenschaften von Verschlussmaterialien, Fluiddruck, Rissbildung, Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses, Lageverschiebung des Schachtverschlusses, Permeabilität			zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	
2.1.09.02 Auflösung und Ausfällung	A.) Lösungen im Grubenbau	Lösungszutritt in Grubenbaue				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Versatzmaterial, 2.) Zusammensetzung des Verschlussmaterials, 3.) Fluiddruck, 4.) Geochemisches Milieu im Grubenbau, 5.) Wärmeproduktion	Beeinflusst durch (2. Ebene): Diapirismus, Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen, Verdampfen von Wasser, Radiolyse, Fluidvorkommen im Wirtsgestein, Thermomigration		zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen



FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
	B.) Verdampfen von Wasser	—	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Fluiddruck, Geochemisches Milieu im Grubenbau, Wärmeproduktion					
2.1.09.03 Metallkorrosion	A.) Lösungen im Grubenbau	Lösungszutritt in Grubenbaue	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen		
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Inventar: Metalle, 2.) Eigenschaften der Behälter, 3.) Fluiddruck, 4.) Geochemisches Milieu im Grubenbau, 5.) Wärmeproduktion, 6.) Materialversprödung durch Strahlung	Beeinflusst durch (2. Ebene): Diapirismus, Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen, Verdampfen von Wasser, Radiolyse, Fluidvorkommen im Wirtsgestein, Thermomigration					
2.1.12.06 Imprägnierung	—				zu berücksichtigen	
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Gasmenge im Grubenbau, 2.) Wirtsgestein						

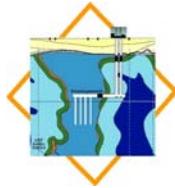


FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
2.2.01.01 Auflockerungszone	A.) Rissbildung	—				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien, 2.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses, 3.) Konvergenz, 4.) Thermische Expansion und Kontraktion, 5.) Wirtsgestein, 6.) Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	Beeinflusst durch (2. Ebene): Permafrost, Eigenschaften von Verschlussmaterialien, Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen, Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses, Konvergenz, Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses, Lageverschiebung des Schachtverschlusses, Thermische Expansion und Kontraktion, Auflockerungszone, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung, Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein		zu berücksichtigen	zu berücksichtigen		
	B.) Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen	Auffahrung der Grube				
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Einlagerungsgeometrie und -abfolge, Vollständige Inlandvereisung, Eigenschaften der Behälter,	Fluiddruck	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen		



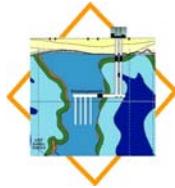
2 Methodik

FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
	Versatz: Eigenschaften des Materials, Eigenschaften von Verschlussmaterialien, Versatzkompaktion, Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses, Quellen des Bentonits, Thermische Expansion und Kontraktion, Wirtsgestein		zu berücksichtigen	zu berücksichtigen		
2.2.06.01 Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	A.) Auffahrung der Grube	—				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Einlagerungsgeometrie und -abfolge, 2.) Vollständige Inlandvereisung, 3.) Eigenschaften der Behälter, 4.) Versatz: Eigenschaften des Materials, 5.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien, 6.) Versatzkompaktion, 7.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, 8.) Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses, 9.) Quellen des Bentonits, 10.) Thermische Expansion und Kontraktion, 11.) Wirtsgestein,	Beeinflusst durch (2. Ebene): Keine identifiziert					
	B.) Fluiddruck	—				
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Konvergenz (s. Kap. 4.8.2), Versatzkompaktion, Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien, Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses, Lösungen im Grubenbau, Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren,		zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	



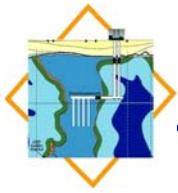
2 Methodik

FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
	Lösungszutritt in Grubenbau, Geochemisches Milieu im Grubenbau, Thermische Expansion und Kontraktion, Verdampfen von Wasser, Gasmenge im Grubenbau, Gasvolumen, Imprägnierung		zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	
2.2.10.03 Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	A.) Thermische Expansion und Kontraktion	Permafrost				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Einlagerungsgeometrie und -abfolge, 2.) Permafrost, 3.) Wirtsgestein	Beeinflusst durch (2. Ebene): Einlagerungsgeometrie und -abfolge, Abfallmatrix: Eigenschaften, Eigenschaften der Behälter, Versatz: Eigenschaften des Materials, Eigenschaften von Verschlussmaterialien, Wirtsgestein	Wärmeproduktion				
	B.) Wärmeproduktion	Radiolyse				
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Geochemisches Milieu im Grubenbau	Radioaktiver Zerfall				



2 Methodik

FEP Abhängigkeiten			Teilsysteme			
	Ausgelöst durch (1. Ebene):	Ausgelöst durch (2. Ebene):	Nahfeld	Strecken und Schächte	Wirtsgestein	Deck- und Nebengebirge
3.2.08.01 Feststoffgebundener Radionuklidtransport	A.) Absinken der Abfallbehälter	—				
Beeinflusst durch (1. Ebene): 1.) Radioaktiver Zerfall	Beeinflusst durch (2. Ebene): Einlagerungsgeometrie und -abfolge, Eigenschaften der Behälter, Konvergenz, Wirtsgestein, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung			zu berücksichtigen	zu berücksichtigen	
	B.) Diapirismus	—				
	Beeinflusst durch (2. Ebene): Keine identifiziert					
<i>Kursiv: Randbedingung</i> — Keine auslösenden FEPs bestimmt						



3. Prämissen bei der Ableitung der FEP-Ausprägungen für das Referenzszenario

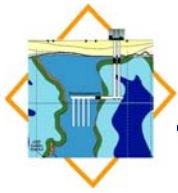
Die Ableitung des Referenzszenarios ist in diesem Bericht als Test der entwickelten Methode anzusehen. Es ist damit nicht Teil eines Sicherheitsnachweises, dem ein umfangreiches Untersuchungsprogramm vorausging. Es liegen somit z. T. keine oder keine ausreichenden Daten zur Bestimmung der Randbedingungen vor, weshalb entsprechende Prämissen gesetzt werden mussten. Außerdem gelten bestimmte Prämissen auch für die Ableitung der FEP-Ausprägungen, um bei einer formalen Berücksichtigung aller FEP-Abhängigkeiten die wenig wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems aus dem Referenzszenario ausschließen zu können.

Unter der Ausprägung eines FEPs werden das Hervortreten und die Wirkung der Eigenschaft, des Ereignisses oder des Prozesses verstanden, die aufgrund ihrer Abhängigkeiten von auslösenden und beeinflussenden FEPs möglich werden. Im FEP-Katalog sind die bei den einzelnen FEPs aufgeführten Abhängigkeiten in den Feldern „Auslösende FEPs“ und „Beeinflussende FEPs“ zu finden.

Allerdings tragen im Falle des Referenzszenarios, das entsprechend seiner Definition eine möglichst große Gesamtheit von als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des zu betrachtenden Endlagersystems beschreibt, nicht alle in den beiden Feldern aufgeführten FEPs in gleicher Weise zu den Ausprägungen der Referenzszenario-FEPs bei. Die Wirkungen auf die Ausprägung der zu betrachtenden wahrscheinlichen Referenzszenario-FEPs bestimmen sich zum einen durch die Art des gewählten spezifischen Endlagerkonzepts und damit verbundenen Prämissen für die als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen und zum anderen durch die Methodik des Vorgehens, indem Referenzszenario und Alternativszenarien mit wahrscheinlichen bzw. wenig wahrscheinlichen FEPs getrennt zu beschreiben sind.

Für die Ableitung der FEP-Ausprägungen sind folgende Prämissen im Endlagersystem zu berücksichtigen:

Das spezifische Endlagerkonzept am Referenzstandort sieht eine Einlagerung von Wärme erzeugenden, hoch radioaktiven Abfällen in einem Salzstock vor. Die Abfälle werden von einer Einlagerungssohle (> 850 m Tiefe) aus in bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern versenkt, die in den Homogenbereichen des Staßfurt-Hauptsalzes angelegt sind. Eine Alternative bestünde in der Streckeneinlagerung von Pollux-Behältern, die allerdings im Rahmen des ISIBEL Projektes für das Referenzszenario nicht betrachtet wird.

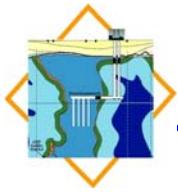


Das Endlagerkonzept sieht vor, die Abfallstoffe zu konzentrieren und den sicheren Einschluss dieser Abfälle über lange Zeiten zu gewährleisten. Eine Rückholbarkeit der Abfälle während und nach der Betriebsphase ist nicht vorgesehen.

Als Material für die Strecken- und Bohrlochverfüllung kommt Salzgrus zum Einsatz, der bei der Streckenauffahrung im Hauptsalz gewonnen wird. Um den gewonnenen Salzgrus trocken zu halten und über eine zwischenzeitliche oberirdische Lagerung einen möglichen Feuchteintrag in die Einlagerungsumgebung zu vermeiden, wird der gewonnene Salzgrus unterirdisch für seine spätere Verwendung vorgehalten.

Für das Referenzszenario ist zu unterstellen, dass

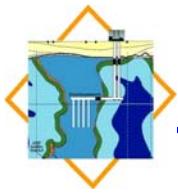
- die geologischen Verhältnisse durch eine detaillierte Erkundung bekannt sind und die Kenntnisse durch die Auffahrung des Einlagerungsbereiches bestätigt werden,
- genügend Räume zur Verfügung stehen, um die Abfälle vollständig und nur im Hauptsalz der Staßfurtfolge mit einem ausreichenden Sicherheitsabstand zu den übrigen angrenzenden und geklüfteten, lösungsführenden Salzgesteinseinheiten einlagern zu können,
- der Einlagerungsbereich sich in einer Tiefe und Umgebung befindet, in der keine geologisch oder klimatisch bedingten Prozesse oder Ereignisse die Funktion der ewB Salzgestein mindern können,
- sich keine Einschränkung durch thermomechanische Einwirkungen aufgrund des Wärmeeintrags oder eines Gasdruckaufbaus hinsichtlich der Funktion des einschlusswirksamen Salzgesteins ergibt,
- die Schacht- und Streckenverschlüsse als einschlusswirksame Barrieren nach Verschluss des Endlagers einen Lösungszutritt von Außen zu den eingelagerten Abfällen verhindern und unter Berücksichtigung der Auflockerungszone solange auslegungskonform mit definierten Durchlässigkeiten und Standzeiten funktionieren, bis die Versatzkompaktion hinreichend fortgeschritten ist,
- die Schacht- und Streckenverschlüsse durch thermomechanische Einwirkungen aufgrund des Wärmeeintrags oder einen Gasdruckaufbau nicht in ihrer Funktions tüchtigkeit innerhalb ihrer erforderlichen Lebensdauer beeinträchtigt werden,



- der Salzgrusversatz die abdichtende Funktion der Schacht- und Streckenverschlüsse übergangslos übernimmt, indem er nach seiner Kompaktion nur eine zu vernachlässigende Permeabilität bzw. keine hydraulisch wirksame Restpermeabilität aufweist,
- nur die Gebirgsfeuchte bzw. die Restfeuchte des trocken gehaltenen Salzgrus und keine anderen Wässer für chemische Reaktionen mit den Abfallgebinden zur Verfügung stehen,
- Lösungsvorkommen im Salzgestein am Übergang vom Leinesteinsalz zum Staßfurtsteinsalz durch eine ausreichende Mächtigkeit der geologischen Barriere (Hauptsalz), durch technische Barrieren und kompaktierten Versatz von den Abfällen ferngehalten werden,
- Zuläufe aus dem Hauptanhidrit in geringer Menge möglich sind jedoch nur bis zu den Streckenverschlüssen, die zusammen mit dem kompaktierten Versatz ein Vordringen der Lösungen in den Einlagerungsbereich verhindern,
- die aufgrund der Gebirgsfeuchte mögliche Metallkorrosion und die damit verbundene Produktion von Gasen nicht zu erheblichen Restporositäten im Versatz oder durch Druckaufbau zu einer Schädigung des umliegenden Gebirges bzw. technischer Barrieren führt und dass
- die zukünftige Klimaentwicklung jener der vergangenen 800.000 Jahre entspricht in denen der Kaltzeit-Warmzeit-Wechsel einem 100.000-Jahreszyklus unterworfen war.

Ergebnisse der Auslegungsrechnungen bestimmen Art, Zusammensetzung und Umfang der Verschlussbauwerke, um ihr planmäßiges Funktionieren bis zu einer ausreichenden Kompaktion des Salzgruses zu gewährleisten. Hierzu werden das Kompaktionsverhalten des Salzgruses und die Auswirkungen der thermomechanischen Beeinflussungen auf das Salzgestein durch Versuche und Modellrechnungen ermittelt.

Die in diesem Bericht gesetzten Prämissen sind wie eingangs erläutert auf den Test der entwickelten Methodik abgestimmt und tragen der Tatsache Rechnung, dass noch nicht alle nötigen Daten erhoben wurden. Prämissen, die später im Rahmen eines Sicherheitsnachweises zur Ableitung eines Referenzszenarios gemacht werden, müssen dann jeweils begründet werden.



4. Beschreibung der FEP-Ausprägungen

Die Beschreibung der FEP-Ausprägungen gliedert sich in mehrere Teile. Zunächst wird das im Referenzszenario zu berücksichtigende FEP kurz definiert und die ewB sowie die Teilsysteme genannt auf die bzw. in denen es einwirkt. Dann werden in zwei Unterkapiteln die auslösenden und beeinflussenden FEPs diskutiert. Bemerkungen, die sich in diesem Teil auf Änderungen in der Version 2 des FEP-Kataloges beziehen, sind beim betroffenen FEP in „Kursivschrift“ eingefügt. Im dritten Unterkapitel wird schließlich eine zusammenfassende Beschreibung der Charakterisierung vorgenommen. Abschließend folgt eine Abbildung, in der die Verknüpfungen der auslösenden und beeinflussenden FEPs noch einmal vollständig, wie in der Version 1 des FEP-Kataloges enthalten, bis in die zweite Ebene dargestellt sind. Dabei wurden in der zweiten Ebene auch die Abhängigkeiten von FEPs aufgenommen, die im Textteil als wenig wahrscheinlich oder im Referenzszenario als nicht zu betrachtend eingestuft wurden. Zur optischen Abgrenzung wurden diese FEPs in der ersten Ebene weiß hinterlegt und die Abhängigkeiten in der zweiten Ebene gestrichelt umrandet.

4.1. FEP Erosion (1.2.07.01)

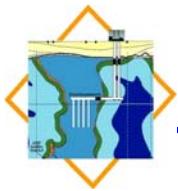
Erosion ist der Oberbegriff für alle zur Abtragung der Erdoberfläche beitragenden Vorgänge. Die durch das FEP betroffenen einschlusswirksamen Barrieren (ewB) sind die Strecken- und Schachtverschlüsse. Einwirkungen sind in den Teilsystemen Strecken und Schächte sowie Deck- und Nebengebirge zu berücksichtigen.

4.1.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Transgression/Regression (1.3.03.01)

FEP mit indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB Strecken- und Schachtverschlüsse und Berücksichtigung in den Teilsystemen Strecken und Schächte sowie Deck- und Nebengebirge.

Mit einer Transgression/Regression ist im Rahmen globaler klimatischer Veränderungen zu rechnen, wenn durch eine anthropogen bedingte Erderwärmung oder im Zuge eines Kalt-/Warmzeit-Wechsels der Meeresspiegel steigt bzw. fällt. Die erosiven Aus-



wirkungen des Prozesses am relativ ebenen und niedrig gelegenen Referenzstandort sind gering (vgl. Beschreibung im FEP-Katalog).

Keine verstärkte Ausprägung der Erosion durch eine Transgression/Regression am Referenzstandort.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

B.) Permafrost (1.3.04.01)

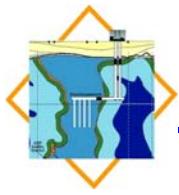
FEP mit direkten Einwirkungen auf die Funktion der ewB Wirtsgestein, Strecken- und Schachtverschlüsse und Berücksichtigung in den Teilsystemen Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

Permafrost verhindert durch das Gefrieren der Erdoberfläche generell eine stärkere Erosion. Allerdings können Frost-Tau-Wechsel-Vorgänge oder Frostspaltung dazu führen, dass eine Erosion im Meter-Bereich und insbesondere an Hanglagen möglich wird. Der Referenzstandort liegt in einer flachen Ebene mit nur wenigen kleinen Erhebungen ohne starke Reliefwechsel.

Mit dem Einsetzen einer neuen Kaltzeit entwickelt sich in ihrem weiteren Verlauf bis zum Hochglazial ein sporadischer, diskontinuierlicher und letztlich ein kontinuierlicher Permafrost. Ein Abbau während Interstadialzeiten zu diskontinuierlichem und sporadischem Permafrost ist möglich. Die Permafrostmächtigkeiten werden mit 150 m bis max. 200 m angenommen.

Das auslösende FEP „Permafrost“ ist für die Bestimmung der Ausprägung des FEP „Erosion“ bedeutungslos, weil durch die beeinflussenden FEPs „Vollständige Inlandvereisung“ und „Oberflächengewässer“ eine Ausbildung von Permafrost verhindert wird (s. entsprechende nachfolgende Abschnitte).

Eine verstärkte Ausprägung der Erosion durch Permafrost ist nicht gegeben.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)

C.) Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)

FEP mit indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB (Strecken- u. Schachtverschlüsse). Die Teilsysteme Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge werden beeinflusst.

Am Rand dürfte die Mächtigkeit des Inlandeises während der Saale-Kaltzeit bis etwa 200 m betragen haben. Für die Weichsel-Kaltzeit werden nur einige Zehnermeter angenommen. Abhängig ist die Eismächtigkeit von der Vorstoß- (große Mächtigkeit) oder der Rückzugsphase (geringe Mächtigkeit), der Morphologie (Hügelkette, Flachland) und der Art des Untergrundes (Wasserfläche, z. B. Eisstausee; Festgestein oder auch gefrorenes Lockergestein, diagenetisch verfestigte Sedimentgesteine, Grundgebirge). Das FEP wirkt sich nur indirekt über eine Beeinflussung der Oberflächengewässer aus, wobei der erosive Anteil in einer Einebnung der ohnehin flachen Erhebungen bestehen könnte.

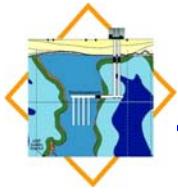
Unbedeutend für die Ausprägung des FEP „Erosion“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.



D.) Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

FEP mit direkten Einwirkungen auf die Funktion der ewB Wirtsgestein sowie Strecken- und Schachtverschlüsse. Berücksichtigung findet es in den Teilsystemen Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

Als auslösendes FEP bestimmt die „Vollständige Inlandvereisung“ in ganz besonderem Maße die Ausprägung des FEP „Erosion“. Gletscherschurf (Exaration) oder andere an das Vorhandensein einer vollständigen Inlandvereisung gebundene Prozesse (z. B. Rinnenbildungen) können erhebliche Erosionsleistungen bewirken. Durch Exaration verursachte Störungen von Lagerungsverhältnissen erreichen in Norddeutschland Tiefen von 200 – 300 m. Die Rinnentiefen liegen in unverfestigten Sedimenten an einigen Stellen der Norddeutschen Tiefebene bei einigen hundert Metern. Prinzipiell ist die Entstehung solcher Rinnen auch während einer zukünftigen Kaltzeit denkbar. Dies würde in Abhängigkeit vom Ausmaß der Rinnenbildung lokal eine Umgestaltung der Sedimente des Deckgebirges bedeuten.

Die Gletschermächtigkeit, die Mobilität des Eises sowie Druck und Temperaturen an der Eisbasis und die Geländeform sind wichtige, das Ausmaß der Erosion steuernde Faktoren. Am Referenzstandort lagen wahrscheinlich Eismächtigkeiten von einigen hundert Metern vor. Die Gletscherfließgeschwindigkeit während eines Eisvorstoßes im Flachland lag vermutlich im Mittel bei ca. 100 m pro Jahr. Lokale Gegebenheiten (Relief, Oberflächengewässer, etc.) konnten Abweichungen vom Mittelwert verursachen. Das mit erheblichen Mengen Sedimentfracht beladende Inlandeis wirkt erosiv, so dass bestehende Täler zugeschüttet oder die aus Lockermaterialien zusammengesetzten Hügel und Hügelketten eingeebnet werden können.

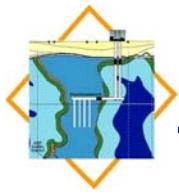
Wichtigstes FEP für die Ausprägung des FEP „Erosion“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert



4.1.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)

Das FEP zeigt keine Einwirkungen auf ewB (Einstufung: „Nicht zutreffend“) Berücksichtigung findet es nur im Teilsystem Deck- und Nebengebirge.

Es sind nur geringe und lokal auftretende Differenzialbewegungen zu erwarten.

Unbedeutend für die Ausprägung des FEP „Erosion“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Konvergenz (2.1.07.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Erkundungssohle (1.1.02.02)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Diapirismus (1.2.09.01)

Subrosion (1.2.09.02)

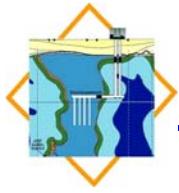
Wirtsgestein (2.2.02.01)

Störungen und Störungszonen (2.2.04.01)

2.) Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

FEP wirkt nur indirekt auf die Funktion der ewB ein und findet Berücksichtigung in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

Globale klimatische Veränderungen bestimmen im Wesentlichen das lokale Klima am Standort. Insbesondere während der Kaltzeiten (s. a. FEPs „Permafrost“, „Inlandvereisung in randlicher Lage“, „Vollständige Inlandvereisung“) sind Prozesse möglich, die hohe Erosionswirkungen nach sich ziehen.



Bedeutsam für die Ausprägung des FEP „Erosion“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

3.) Veränderung des Ökosystems aufgrund Klimawandel (1.3.08.01)

Das FEP hat keine Einwirkungen auf ewB (Einstufung: „Nicht zutreffend“) und wird in keinem Teilsystem berücksichtigt.

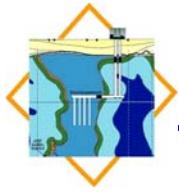
Da das FEP in keinem Teilsystem zu berücksichtigen ist entfällt die Auflistung von auslösenden und beeinflussenden FEPs der 2. Ebene.

Das FEP behandelt inhaltlich Prozesse in der Biosphäre, die nicht Gegenstand des ISIBEL-FEP-Kataloges sind. Es entfällt somit in der überarbeiteten 2. Version des FEP-Kataloges.

4.) Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)

FEP mit indirekten Einwirkungen auf ewB, das im Teilsystem Deck- und Nebengebirge berücksichtigt wird.

Das FEP behandelt inhaltlich Prozesse in der Biosphäre, die nicht Gegenstand des ISIBEL-FEP-Kataloges sind. Es entfällt somit in der überarbeiteten 2. Version des FEP-Kataloges.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Veränderungen der menschlichen Lebensweise aufgrund Klimawandel (1.3.09.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Veränderungen der menschlichen Lebensweise aufgrund Klimawandel (1.3.09.01)

5.) Topographie und Morphologie (2.3.01.01)

Bei dem FEP handelt es sich um eine Randbedingung mit der Einstufung „Nicht zutreffend“ bezüglich Einwirkungen auf die ewB. Berücksichtigt wird es im Teilsystem Deck- und Nebengebirge.

Ein stark gegliedertes Relief fördert die Erosion. Da sich der Referenzstandort in einem flachen Senkungsgebiet befindet, ist mit einer wesentlichen Veränderung der topografischen Verhältnisse im Betrachtungszeitraum nicht zu rechnen. Die Beeinflussung des FEP „Erosion“ durch die Randbedingung Topographie und Morphologie ist nur gering und zu vernachlässigen.

Unbedeutend für die Ausprägung des FEP „Erosion“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Diapirismus (1.2.09.01)

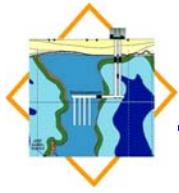
Transgression/Regression (1.3.03.01)

Permafrost (1.3.04.01)

Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)



6.) Oberflächengewässer (2.3.04.01)

Es handelt sich bei dem FEP um eine Randbedingung mit indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB. Es wird in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge berücksichtigt.

Seen und Teiche tragen nicht wesentlich zur Ausprägung der Erosion bei. Fließgewässer sind je nach Wasserführung und Gefälle in der Lage, verstärkt erosiv tätig zu werden.

Mäßige Bedeutung für die Ausprägung des FEP Erosion.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Topographie und Morphologie (2.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Permafrost (1.3.04.01)

Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Veränderung des Ökosystems aufgrund Klimawandel (1.3.08.01) (Revision: entfällt)

Veränderung der menschlichen Lebensweise aufgrund Klimawandel (1.3.09.01)

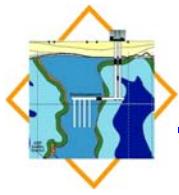
Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)

Störungen und Störungszonen (2.2.04.01)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

7.) Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

FEP mit indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB und Berücksichtigung in den Teilsystemen Wirtsgestein, Strecken und Schächte sowie Deck- und Nebengebirge.



Das FEP behandelt inhaltlich Prozesse in der Biosphäre, die nicht Gegenstand des ISIBEL-FEP-Kataloges sind. Es entfällt somit in der überarbeiteten 2. Version des FEP-Kataloges.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Transgression/Regression (1.3.03.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

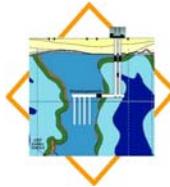
4.1.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Erosion (1.2.07.01)

Der Referenzstandort liegt in einem Gebiet mit geringem Relief und Absenkungstendenz, so dass die Erosion generell gering ausgeprägt ist.

Während des Hochglazials einer Kaltzeit kann eine Inlandeisüberdeckung (auslösendes FEP, 1. Ebene) des Standortes möglich werden. In dieser Zeitspanne sind erhebliche Erosionsleistungen zu erwarten. Sie bestehen im Wesentlichen aus der Bildung von tiefen Rinnen unterhalb des Inlandeises und aus der Exaration.

Beeinflussende Faktoren für das FEP „Erosion“ ergeben sich nur aus dem FEP „Globale klimatische Veränderungen“ und abgeschwächt aus dem FEP „Oberflächengewässer“.

Aus den auslösenden FEPs der 2. Ebene lassen sich dagegen keine weiteren Gesichtspunkte für die Ausprägung ableiten, da sie schon durch beeinflussende FEPs berücksichtigt werden oder im FEP-Katalog für die Teilsysteme als „nicht zu berücksichtigen“ eingestuft sind. Sie entfallen damit für eine Diskussion zur Abschätzung der Erosionsausprägung.



4.1. FEP Erosion (1.2.07.01)

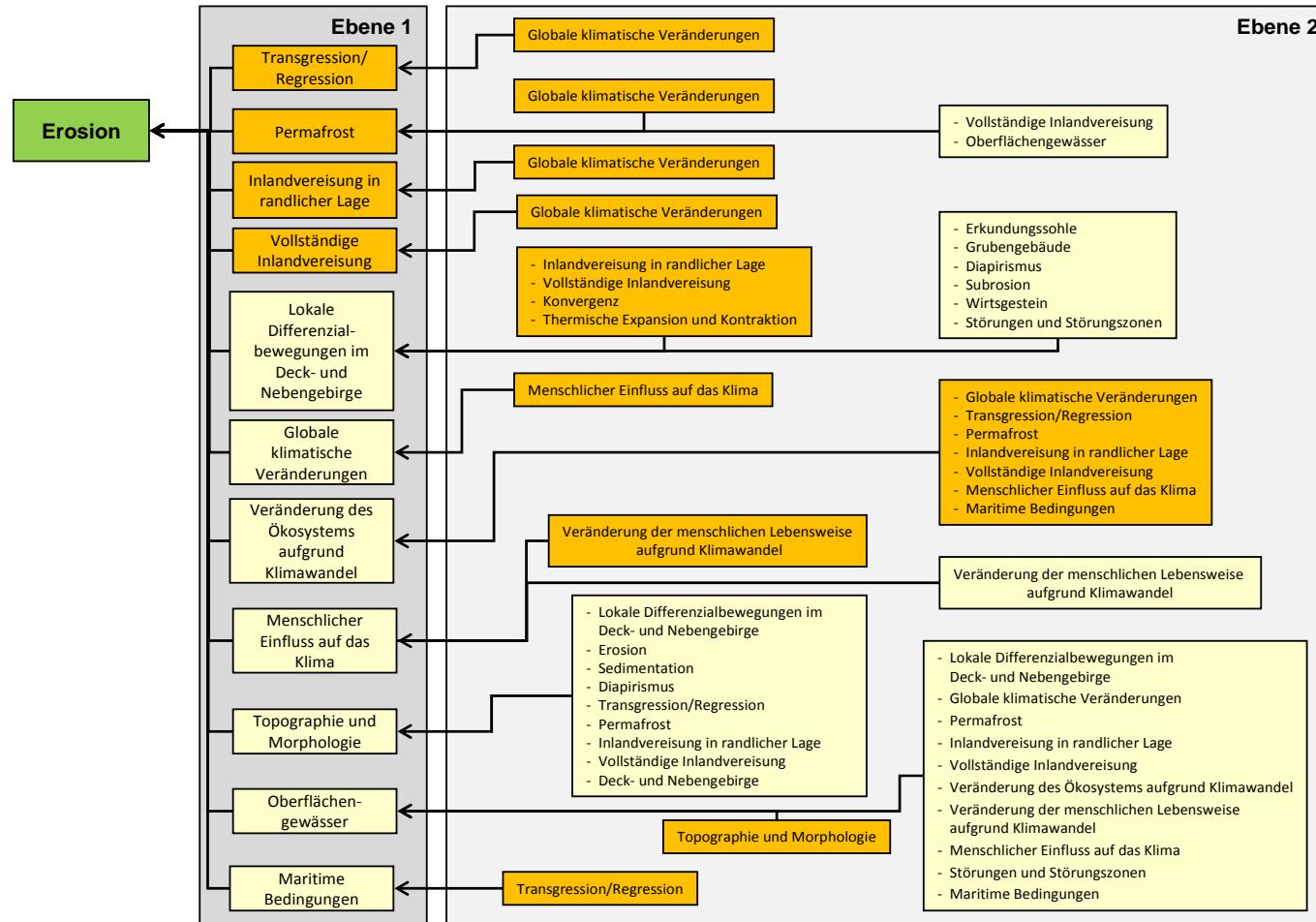
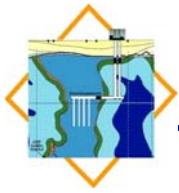


Abb. 2: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Erosion bis in die 2. Ebene.



4.2. FEP Subrosion (1.2.09.02)

Definiert ist die Subrosion als unter der Erdoberfläche durch Grundwasser stattfindende Ablaugung leichtlöslicher Gesteine, insbesondere Salze.

Die durch das FEP direkt betroffene ewB ist das Wirtsgestein. Zu berücksichtigen ist es ebenfalls nur im Teilsystem Wirtsgestein.

4.2.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Geosphäre: Grundwasserströmung (2.2.07.03)

Nur das FEP „Geosphäre: Grundwasserströmung“ ist bislang als auslösend und damit ausprägend für das FEP „Subrosion“ bestimmt. Das FEP ist eine Randbedingung und wirkt indirekt auf die ewB. Es ist im Teilsystem Wirtsgestein zu berücksichtigen.

Die Grundwasserströmung und damit der Abtransport von gelösten Salzen können sich während einer Kaltzeit durch verschiedene Prozesse erhöhen.

Bedeutend für die Ausprägung des FEP „Subrosion“ insbesondere bei kaltzeitlichen Verhältnissen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Permafrost (1.3.04.01)

Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)

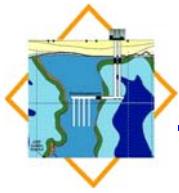
Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Hydrogeologische Veränderungen aufgrund Klimawandels (1.3.07.01)

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

Permeabilität (2.1.08.02)

Störungen und Störungszonen (2.2.04.01)



Geosphäre: Eigenschaften der Transportpfade (2.2.05.01)

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge (2.2.08.01)

Topographie und Morphologie (2.3.01.01)

Aquifere (2.3.03.01)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

4.2.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Diapirismus (1.2.09.01)

FEP, dessen Einwirkungen auf die Funktion der ewB als „nicht zutreffend“ eingestuft sind. Berücksichtigt wird es in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

Die gegenwärtigen Aufstiegsraten des Salzstocks sind mit etwa 0,02 mm/Jahr klein, da nur noch wenig Restsalz in den Randsenken als Nachschub zur Verfügung steht und die neotektonischen Gegebenheiten keine kompressiven Spannungsverhältnisse für einen weiteren Aufstieg verursachen. Die Größe der Aufstiegsrate gleicht etwa der der Subrosionsrate, so dass sich daraus eine stabile Tiefenlage des Salzspiegels ergibt.

Keine verstärkte Ausprägung der Subrosion durch den Diapirismus.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Topographie und Morphologie (2.3.01.01)



2.) Permafrost (1.3.04.01)

FEP mit direkten Einwirkungen auf die Funktion der ewB Wirtsgestein, Strecken- und Schachtverschlüsse und Berücksichtigung in den Teilsystemen Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

Permafrost verhindert durch das Gefrieren der Geosphäreschichten (Deck- und Nebengebirge) generell eine Strömung des Grundwassers. Die Permafrostmächtigkeiten werden mit 150 m bis maximal 200 m angenommen. Da die Oberfläche des Hutgestein bzw. des Salzspiegels am Referenzstandort teilweise tiefer liegt, ist unterhalb des Permafrosts eine Grundwasserströmung möglich. Diese wird verändert, da durch den Permafrost gespannte Grundwasserverhältnisse oder im Falle von vorhandenen tiefen Oberflächengewässern die Strömung beeinflussende Taliki entstehen können.

Das beeinflussende FEP „Permafrost“ ist für die Bestimmung der Ausprägung des FEP „Subrosion“ bedeutend.

Analog zum FEP „Permafrost“ müsste als „beeinflussend“ das FEP „Vollständige Inlandvereisung“ in der Version 2 des ISIBEL FEP-Kataloges genannt werden (Rinnenbildung wichtiger Prozess für das FEP „Subrosion“).

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

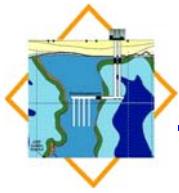
Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)

3.) Hydrogeologische Veränderungen aufgrund Klimawandels (1.3.07.01)

FEP mit indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB und nur für das Teilsystem Deck- und Nebengebirge zu berücksichtigen.



Hydrogeologische Veränderungen werden insbesondere durch einen Wandel der klimatischen Verhältnisse hervorgerufen. Es ändern sich die Grundwasserbeschaffenheit und der Grundwasserfluss.

Das beeinflussende FEP „Hydrogeologische Veränderungen aufgrund Klimawandels“ ist für die Bestimmung der Ausprägung des FEP „Subrosion“ während eines Klimawechsels (Warm- bzw. Kaltzeit) bedeutend.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)
- Transgression/Regression (1.3.03.01)
- Permafrost (1.3.04.01)
- Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)
- Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Topographie und Morphologie (2.3.01.01)
- Oberflächengewässer (2.3.04.01)

4.) Wirtsgestein (2.2.02.01)

Bei dem FEP handelt es sich um eine Randbedingung mit der Einstufung „nicht zutreffend“ in Bezug auf Einwirkungen auf die Funktion der ewB. Es wird in den Teilsystemen Nahfeld, Wirtsgestein sowie Strecken und Schächte berücksichtigt.

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. Im Mittel wird die Salzspiegelfläche aber durch die Subrosion relativ eben ausgebildet sein, da eine vorauseilende Salzauflösung an einer bestimmten Stelle durch sich bildende gesättigte Lösungen verringert wird bzw. zum Stillstand kommt.



Das beeinflussende FEP „Wirtsgestein“ ist für die Bestimmung der Ausprägung des FEP „Subrosion“ unbedeutend.

Das FEP „Wirtsgestein“ wurde abweichend zum FEP-Katalog (Version 1) aufgenommen, da die entsprechenden Vorgänge zum Systemverständnis der Subrosion beitragen auch wenn deren Beeinflussung nur gering ausfällt. In der Version 2 des Kataloges ist das FEP ebenfalls in die Liste der beeinflussenden aufgenommen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Diapirismus (1.2.09.01)
- Subrosion (1.2.09.02)
- Permafrost (1.3.04.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Radiolyse (2.1.13.03)

5.) Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge (2.2.08.01)

Das FEP ist eine Randbedingung mit indirekter Wirkung auf die Funktion der ewB und ist für das Teilsystem Deck- u. Nebengebirge zu berücksichtigen.

Es wirkt sich durch die Veränderung der im Grundwasser gelösten Salzmengen auf die Subrosion aus. Ein Austausch von hoch mineralisierten Grundwässern mit Süßwässern im Bereich des Salzspiegels kann insbesondere durch sich ändernde Druckgradienten während einer Kaltzeit (z. B. Rinnenbildung) erwartet werden.

Das beeinflussende FEP „Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge“ ist für die Bestimmung der Ausprägung des FEP „Subrosion“ bedeutend.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Sedimentation (1.2.07.02)

Subrosion (1.2.09.02)

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Permafrost (1.3.04.01)

Hydrogeologische Veränderungen aufgrund Klimawandels (1.3.07.01)

Veränderung des Ökosystems aufgrund Klimawandel (1.3.08.01) (Revision: entfällt)

Geosphäre: Grundwasserströmung (2.2.07.03)

Mikrobielle Prozesse in der Geosphäre (2.2.09.01)

Aquifere (2.3.03.01)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

Chemische Speziation (3.2.02.01)

Sorption, Desorption (3.2.03.01)

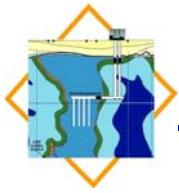
Kolloide (3.2.04.01)

Komplexbildung (3.2.05.01)

6.) Temperaturänderung am Salzspiegel (2.2.10.04)

Wahrscheinlich eintretendes FEP mit indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB, das im Teilsystem Wirtsgestein sowie im Deck- und Nebengebirge berücksichtigt wird.

Temperaturänderungen am Salzspiegel beeinflussen die Löslichkeit von Salzmineralien. Sie treten in geringem Umfang durch die Wärmeproduktion der Abfälle nur während der ersten Tausend Jahre nach Verschluss des Endlagers auf. Zukünftiger, im Zuge einer neuen Kaltzeit gebildeter, maximal 150 m bis 200 m mächtiger Permafrost reicht nicht bis in die Tiefenlage des heutigen Salzspiegels. An der Basis des Permafrost befinden sich durch den Gefrierprozess hoch mineralisierte und abgekühlte



Grundwässer, die aufgrund des geringen Konzentrationsgefälles weniger in der Lage sind, zusätzliches Salzgestein am Salzspiegel zu lösen.

Das beeinflussende FEP „Temperaturänderung am Salzspiegel“ ist für die Bestimmung der Ausprägung des FEP „Subrosion“ unbedeutend.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Permafrost (1.3.04.01)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

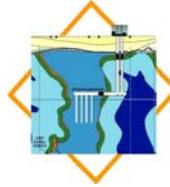
Geosphäre: Grundwasserströmung (2.2.07.03)

4.2.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Subrosion (1.2.09.02)

Die langfristigen Subrosionsraten wurden mit 0,01 bis 0,02 mm/Jahr bestimmt. Wegen der Tiefenlage des Salzspiegels ist die heutige Subrosionswirkung als gering zu bewerten.

Das FEP erfährt eine besondere Ausprägung durch beeinflussende und auslösende FEPs, die unter kaltzeitlichen Bedingungen verstärkt einwirken. Unter diesen besonderen Bedingungen, vor allem im Gefolge von glazialen Rinnenbildungen, können sich die Subrosionsraten zeitweise (z. B. für den Zeitraum von der späten Elster-Kaltzeit bis zum Post-Holstein: ca. 40.000 - 50.000 Jahre Dauer) auf 0,3 mm/Jahr erhöhen.



4.2. FEP Subrosion (1.2.09.02)

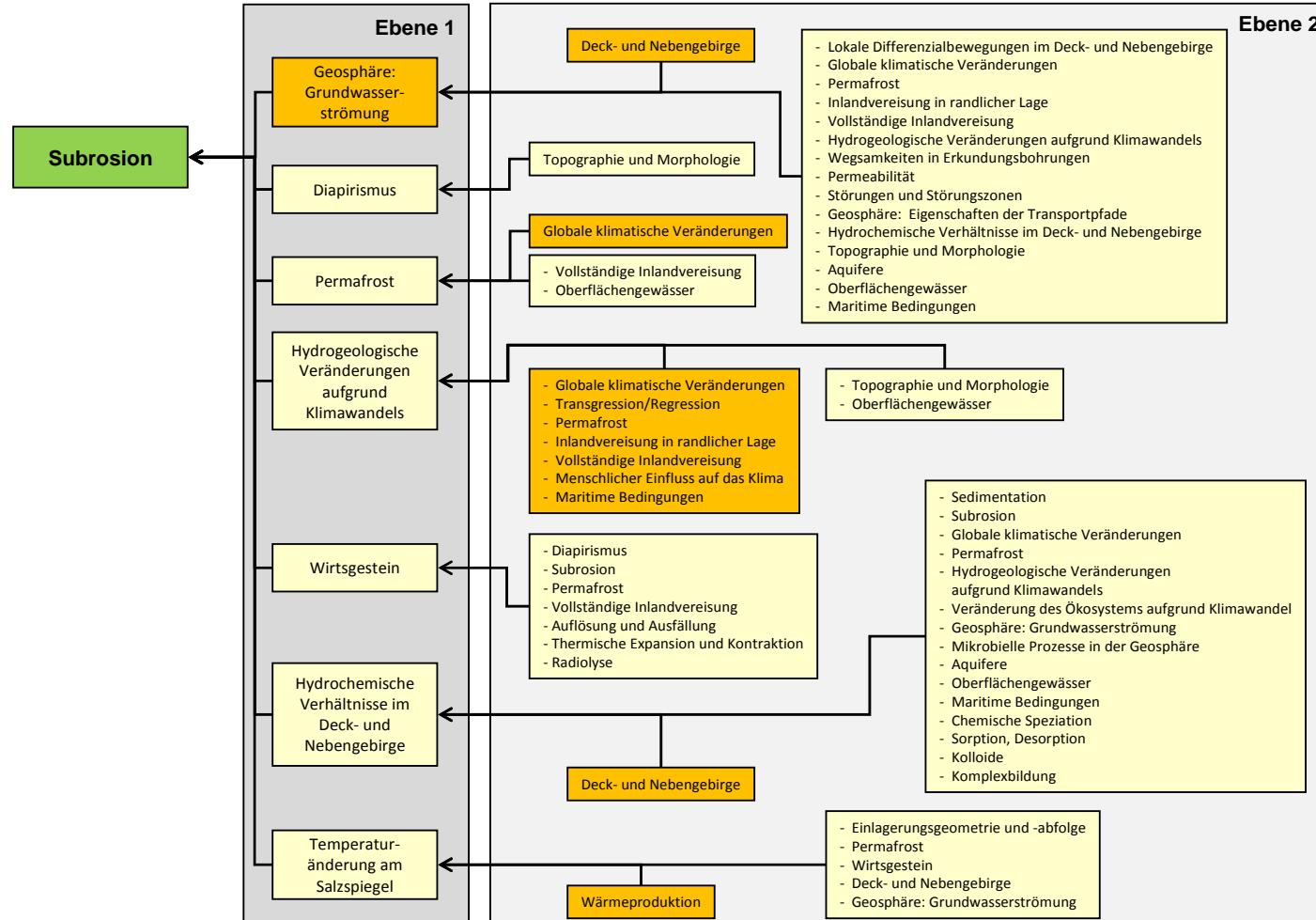
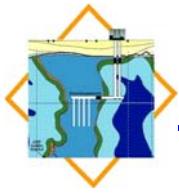


Abb. 3: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Subrosion bis in die 2. Ebene.



4.3. FEP Permafrost (1.3.04.01)

Permafrost bezeichnet den Zeitabschnitt einer Kaltzeit, bei dem die Jahresmitteltemperaturen niedriger als -2°C sind und ein Permafrostboden vorherrscht, ohne dass das Gebiet von einem Gletscher überdeckt ist. Durch das FEP betroffene ewB sind Strecken- und Schachtverschlüsse sowie Wirtsgestein. Beeinflusst werden die Teilsysteme Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

4.3.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

FEP wirkt nur indirekt auf die Funktion der ewB ein und findet Berücksichtigung in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

Vgl. die für das FEP „Erosion“ bestimmte Wirkungshierarchie (1. und 2. Ebene).

Das FEP ist die Voraussetzung für das Eintreten von Permafrost. Wenn die globalen klimatischen Veränderungen der Vergangenheit auf die klimatische Perspektive der nächsten Million Jahre extrapoliert werden, ist mit erneutem Permafrost am Referenzstandort zu rechnen.

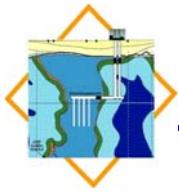
Bedeutend für die Ausprägung des FEP „Permafrost“.

Auslösende FEPs (2. Ebene)

Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.



4.3.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Direkte Einwirkungen auf die Funktion der ewB Wirtsgestein sowie Strecken- und Schachtverschlüsse. Berücksichtigt wird es in den Teilsystemen Wirtsgestein, Strecken und Schächte sowie Deck- und Nebengebirge.

Eine vollständige Inlandvereisung kann den unter dem Eis in Eisrandferne liegenden Permafrost reduzieren.

Unbedeutend für die Ausprägung des FEP „Permafrost“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

2.) Oberflächengewässer (2.3.04.01)

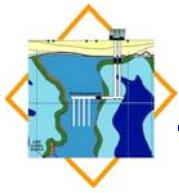
Das FEP ist eine Randbedingung, die indirekt auf die Funktion der ewB einwirkt und in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge berücksichtigt wird.

Oberflächengewässer steuern in Abhängigkeit ihrer Wasserführung, Wassertiefe (> 3 m) und Ausdehnung die Ausbildung des Permafrost. Unterhalb von großen und tiefen Oberflächengewässern werden Taliki, aber kein Permafrost ausgebildet.

Unbedeutend für die Ausprägung des FEP „Permafrost“, da keine Auswirkungen durch das FEP „Oberflächengewässer“ vorliegen, die die Ausprägung intensivieren.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Topographie und Morphologie (2.3.01.01)



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)
- Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)
- Permafrost (1.3.04.01)
- Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Veränderung des Ökosystems aufgrund Klimawandel (1.3.08.01) (Revision: entfällt)*
- Veränderung der menschlichen Lebensweise aufgrund Klimawandel (1.3.09.01)
- Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)
- Störungen und Störungszonen (2.2.04.01)
- Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

4.3.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Permafrost (1.3.04.01)

Die Ausprägung des FEP „Permafrost“ wird durch die Intensität und Dauer einer neuen Kaltzeit bestimmt. Aus den Erkenntnissen über die vergangenen kaltzeitlichen Verhältnisse ist am Referenzstandort mit ca. 150 m bis 200 m Permafrost zu rechnen.

Mit dem Einsetzen einer neuen Kaltzeit entwickelt sich in ihrem weiteren Verlauf bis zum Hochglazial ein sporadischer, diskontinuierlicher und letztlich ein kontinuierlicher Permafrost. Ein Abbau während Interstadialzeiten zu diskontinuierlichem und sporadischem Permafrost ist möglich. Aufgrund der zu erwartenden Mächtigkeit würden nur die oberflächennahen Anteile der Schächte betroffen sein. Mit einer Abkühlung der tiefer liegenden Schachtteile und auch des Wirtsgesteins in geringem Maße ist zu rechnen. Da der Salzspiegel aber unterhalb der maximalen Mächtigkeit des Permafrost liegt, sind anders als bei nahe der Oberfläche liegenden Salzstöcken keine kryogenen Risse zu erwarten. Am Referenzstandort wurden diese trotz intensiver Erkundungstätigkeit bislang nicht nachgewiesen. Sie werden daher auch nicht im Referenzszenario unterstellt, sondern im Rahmen von Alternativszenarien diskutiert und ihre Sicherheitsrelevanz durch entsprechende Modellrechnungen behandelt.

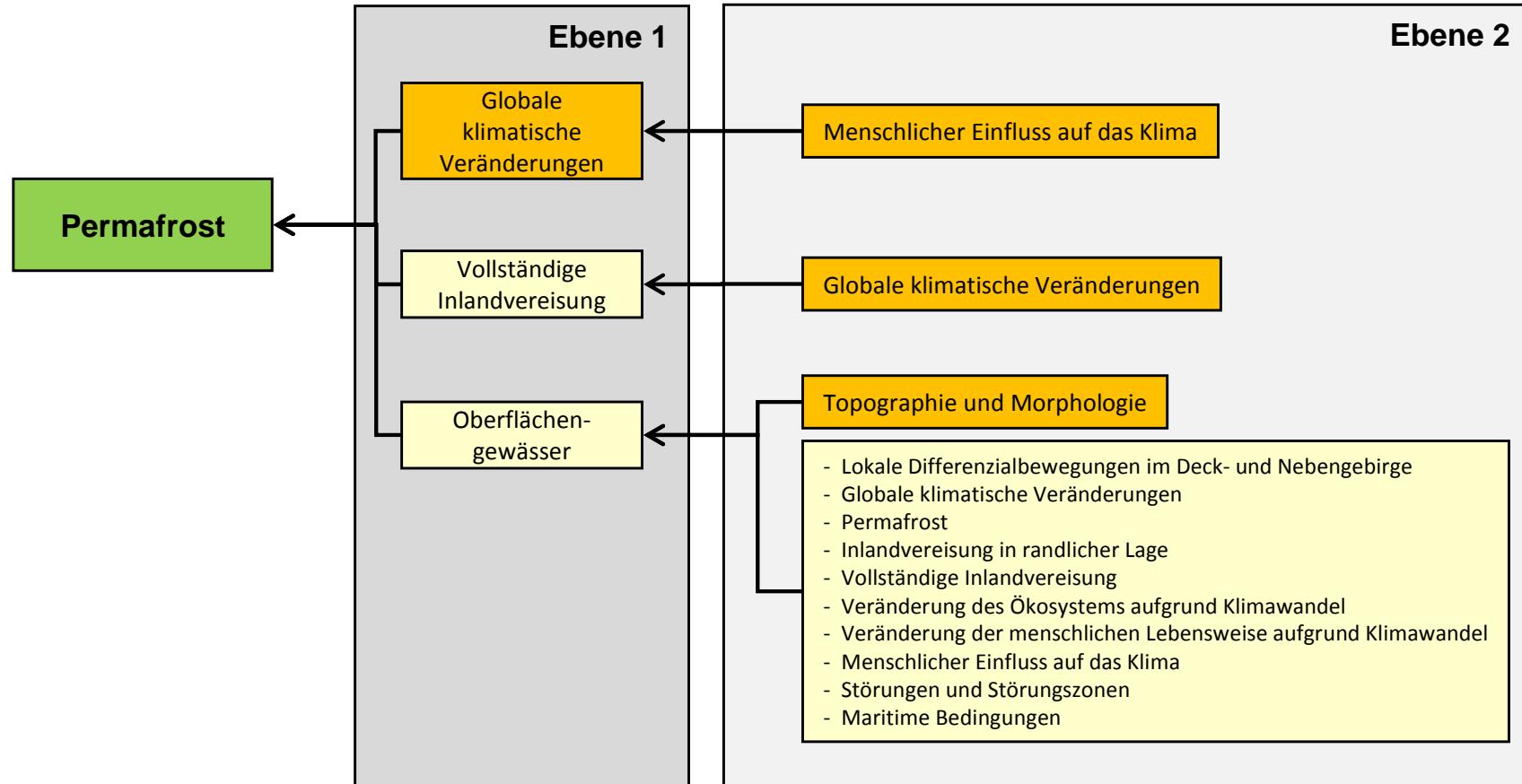
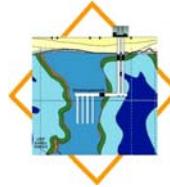
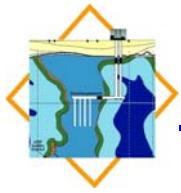


Abb. 4: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Permafrost bis in die 2. Ebene.



4.4. FEP Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Das FEP beschreibt den Abschnitt einer Kaltzeit in der der Referenzstandort bei einer deutlichen Absenkung der Jahresmitteltemperaturen vollständig von einem mächtigen Inlandeisgletscher überdeckt ist. Es ist ein FEP mit direkten Einwirkungen auf die Funktion der ewB Wirtsgestein sowie Strecken- und Schachtverschlüsse. Berücksichtigung findet es in den Teilsystemen Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

4.4.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

FEP wirkt nur indirekt auf die Funktion der ewB ein und findet Berücksichtigung in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

Ohne eine Klimaänderung im globalen Maßstab ist die Überdeckung des Referenzstandorts mit Inlandeis nicht möglich. Wenn die globalen klimatischen Veränderungen der Vergangenheit auf die klimatische Perspektive der nächsten Million Jahre extrapoliert werden, ist mehrfach mit einer erneuten, vollständigen Inlandvereisung am Referenzstandort zu rechnen. Globale klimatische Veränderungen ergaben sich vor etwa 800.000 Jahren, als sich die Zyklendauer eines Warm-/Kaltzeit-Umschwungs von ca. 40.000 nach 100.000 Jahren verschob. Im Gefolge erhöhten sich die Temperaturdifferenzen zwischen Warm- und Kaltzeiten sowie ihre Dauer. Die vom Eis überdeckte Landfläche erstreckte sich von Skandinavien aus weit nach Süden bis hin zu den deutschen Mittelgebirgen.

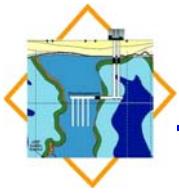
Bedeutend für die Ausprägung des FEP Vollständige Inlandvereisung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene)

Keine identifiziert.



4.4.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

Keine identifiziert.

4.4.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Die Ausprägung des FEP Vollständige Inlandvereisung wird durch die Intensität und Dauer einer neuen Kaltzeit bestimmt, die von den globalen klimatischen Änderungen abhängen. Von Skandinavien ausgehend drang in der letzten halben Million Jahre das Inlandeis besonders weit nach Süden vor. Dabei wurde mit Ausnahme der letzten Kaltzeit der Referenzstandort mehrfach mit Eis überdeckt. Die maximalen Eismächtigkeiten am Referenzstandort erreichten dabei während des Hochglazials einer Kaltzeit einige hundert Meter.

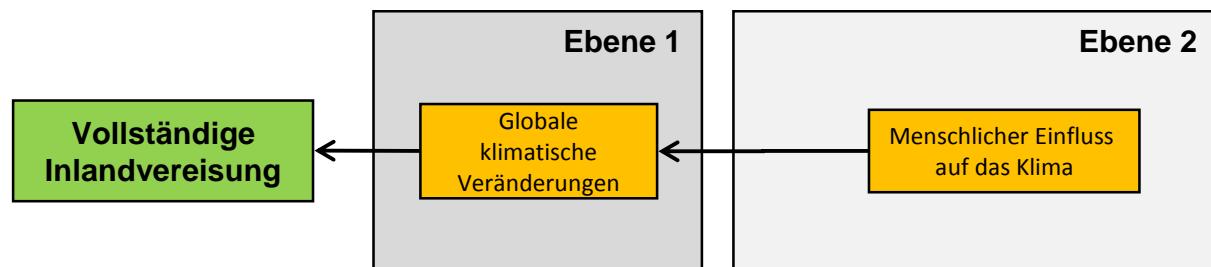
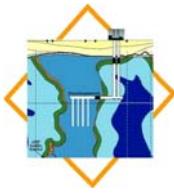


Abb. 5: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Vollständige Inlandvereisung bis in die 2. Ebene



4.5. FEP Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

Das FEP charakterisiert die Eigenschaften der in die Grubenbaue eingebrachten Versatzmaterialien, die deren Verhalten gegenüber chemischen, thermischen, mechanischen und anderen physikalischen Einwirkungen bestimmen. Es wirkt direkt auf die Funktion der ewB Strecken- und Schachtverschlüsse ein und wird auch nur im Teilsystem Strecken und Schächte berücksichtigt.

Das FEP wird nach der Revision des FEP-Kataloges mit dem FEP „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ zusammengefasst.

4.5.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01)

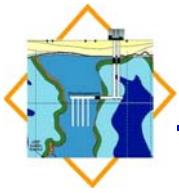
Die Zusammensetzung des Verschlussmaterials hat keine direkten Einwirkungen auf die Funktion der ewB.

Das Schließungskonzept sieht die Errichtung mehrerer Strecken- und Schachtverschlüsse vor. Bevorzugte Baumaterialien für die Streckenverschlüsse sind Salzgrusbriketts aus gepresstem Salzgrus und Salz- bzw. Sorelbeton.

Zur Verfüllung der Schächte ist langzeitstabiler Schotter, z. B. aus Basalt, vorgesehen. Die aus Widerlagern und Dichtelementen bestehenden Schachtverschlüsse werden aus verschiedenartigen Materialien bestehen. Neben dem Salz- oder Sorelbeton für die Widerlager werden Bentonit sowie Bitumen und Gussasphalte für Dichtelemente eingesetzt.

Die Auswahl der geeigneten Bentonit-Sorten erfolgt nach den Anforderungen, die sich aus Prognoserechnungen zur Kompaktion des Salzgruses ableiten. Zur Begrenzung des Quellvermögens und zur Erhöhung der mechanischen Stabilität können auch Gemische aus Bentonit und Sand oder anderen Mineralien bzw. Mineralgemischen eingesetzt werden.

Nach der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ und „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ zusammengefasst.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

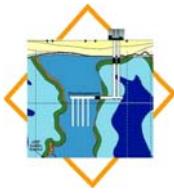
Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

4.5.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen beschreibt die Umwandlung von mineralischen Baumaterialien aufgrund ungünstiger geochemischer Umgebungsbedingungen über die Zeit. Das FEP hat direkte Einwirkungen auf die Funktion von Strecken- und Schachtverschlüssen.

Materialien für die Strecken- und Schachtverschlüsse werden so gewählt, dass sie unter den Standortbedingungen über die geplante Standzeit (Lebensdauer) der Verschlussbauwerke beständig sind und die aus den Sicherheitsnachweisen abgeleiteten Dichtheits- bzw. Stabilitätskriterien erfüllen. Die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen von Strecken- und Schachtverschlüssen nimmt für spätere Zeiten infolge Alteration des Verschlussmaterials zu. Auslöser der Alteration sind ungünstige Veränderungen des geochemischen Milieus, die auf einen Lösungszutritt, das Durchströmen von Versatz und technischen Barrieren, die Alteration von Abfallgebinden und die Auflösung und Ausfällung aus den Lösungen zurückzuführen sind. In der Folge kann es zu einem teilweise oder vollständigen Verlust der Barrierenintegrität kommen. Da während der geplanten Standzeiten der Barrieren nur geringe Lösungsmengen im Grubengebäude vorhanden sind, findet eine Alteration der Barrieren in dieser Phase nur in geringem Umfang statt. Zu späten Zeiten kann es bei einem dann nicht auszuschließenden Versagen der Schachtverschlüsse zu einem Lösungszutritt zum Grubengebäude kommen. Dann ist der Salzgrus aber so weit kompaktiert, dass er das Vordringen von Lösungen in Einlagerungsbereiche verhindert. Eine Alteration und ein Versagen von Strecken- und Schachtverschlüssen zu dieser Zeit wären sicherheitstechnisch nicht mehr relevant.



Das FEP ist zu späten Zeiten der Referenzentwicklung für das FEP „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ bedeutsam, aber dann aufgrund der fortgeschrittenen Salzgruskompaktion nicht mehr relevant für die Langzeitsicherheit.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

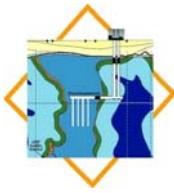
2.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

3.) Konvergenz (2.1.07.01)

Unter Konvergenz wird die Querschnittsverkleinerung von untertägigen Hohlräumen verstanden, die nach der Auffahrung aufgrund von Spannungsumlagerungen im umgebenden Gebirge einsetzt und zur Versatzkompaktion führt. Das FEP wirkt direkt auf die Strecken- und Schachtverschlüsse sowie auf das Wirtsgestein ein.

Durch die Auffahrung des Grubengebäudes wird das natürliche Spannungsfeld des Wirtsgesteins verändert. Auf die an der Hohlraumkontur und im angrenzenden Gebirge wirkenden Spannungen reagiert das Salzgestein mit ± großen Verformungen. Dadurch



wird der zur Stabilisierung eingebrachte Salzgrus kompaktiert und in der Folge das zur Fluidspeicherung verfügbare Hohlraumvolumen und der durchströmbarer Porenraum reduziert. In der Nachbetriebsphase wird sich mit fortschreitender Salzgruskompaktion ein Stützdruck aufbauen, bis schließlich der lithostatische Druck erreicht ist und die Konvergenz zum Stillstand kommt. Weiterhin werden durch die auflaufende Konvergenz die geotechnischen Barrieren in wenigen Monaten eingespannt und anschließend die Risse in der Auflockerungszone um die Streckenkontur geschlossen. Hierdurch werden die Permeabilitäten reduziert, was Auswirkungen auf den Fluideindruck in den Grubenbauen und die Spannungsverhältnisse im Gebirge hat.

Die Einspannung der Barrieren durch die Konvergenz führt zu einer raschen Setzung des Baumaterials mit Porositäts-/Permeabilitätsverringerung und beeinflusst daher die Eigenschaften der Verschlussmaterialien.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Permafrost (1.3.04.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

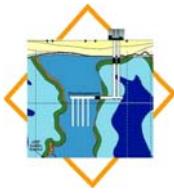
Fluideindruck (2.1.07.03)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen von Materialien (2.1.07.05)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)



Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

4.) Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

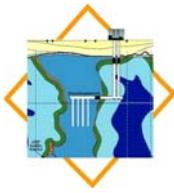
Die in einem Grubenbau vorhandenen Lösungen stammen aus der Versatzfeuchte, einem Zutritt aus dem Wirtsgestein oder aus dem Deck- bzw. Nebengebirge. Das FEP hat indirekte Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren.

Bei einer ungestörten Standortentwicklung sind während der geforderten Standzeiten der Barrieren in den Grubenbauen nur geringe Lösungsmengen aus den eingelagerten Abfallgebinden oder aus der Versatzfeuchte (ca. 0,3 Gew. %) vorhanden. Weiterhin können aus den aufgelockerten Gebirgsbereichen und durch die wärmebedingte Migration von kleinen Lösungseinschlüssen (fluid inclusions: mm³ bis cm³) Lösungen in die Grubenbaue gelangen. Diese kleinen Lösungsmengen haben nur geringe Auswirkungen auf die einschlusswirksamen Barrieren und sind lediglich bei der Behälterkorrosion zu berücksichtigen. Bei den Schachtverschlüssen wird von Anfang an ein Kontakt mit Deckgebirgslösungen unterstellt und die Barrieren entsprechend ausgelegt. Erst zu späten Zeiten kann es bei einem dann nicht auszuschließenden Versagen der Schachtverschlüsse nach Ablauf seiner Lebensdauer zu einem Zutritt größerer Lösungsmengen ins Grubengebäude kommen. Da der Salzgrus zu dieser Zeit aber weitgehend kompaktiert und dicht ist, kann ein Vordringen der Lösungen bis zu den Einlagerungsfeldern – selbst bei dem Versagen einzelner Verschlussbauwerke nach ihrer geplanten Lebensdauer – ausgeschlossen werden.

Die Lösungen im Grubenbau können vor allem zu späten Zeiten für das FEP „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ relevant werden.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Diapirismus (1.2.09.01) (Revision: entfällt als beeinflussendes FEP)

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Radiolyse (2.1.13.03)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

Thermomigration (2.2.10.05)

5.) Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Aufgrund seiner geringen Permeabilität ist Bentonit als Abdichtungsmaterial in den Schachtverschlüssen vorgesehen. Durch Wasseraufnahme quillt Bentonit und übt im eingespannten Zustand einen Druck auf die Hohlraumkontur und das angrenzende Gebirge aus. Die Höhe des Quelldrucks wird über die Art und Zusammensetzung des Bentonits, den Wassergehalt beim Einbau sowie die Einbaudichte festgelegt und darf den Fracdruck des Gebirges nicht überschreiten. Durch entsprechende Maßnahmen bei der Errichtung werden eine langsame Aufsättigung des Bentonits und so ein gleichmäßiger Quelldruck gewährleistet. Dadurch werden Umläufigkeiten in der Kontaktzone, lokale Erosion sowie „Piping“ vermieden. Da das Quellpotential des Bentonits mit zunehmender Salinität zunimmt, wird die Auswahl des eingesetzten Bentonit-Typs dem Chemismus der zu erwartenden Lösungen angepasst.

Das FEP hat direkte Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse und das Wirtsgestein und ist für die „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ von großer Bedeutung.

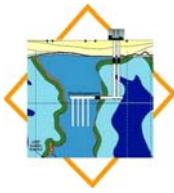
Auslösende FEPs (2. Ebene):

Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))



Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Wärmeleitung (2.1.11.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

6.) Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Durch Auflösung kann das Wirtsgestein, die Abfallmatrix oder das Baumaterial einer Barriere zersetzt werden, so dass die Bestandteile in Lösung gehen und, sobald die Löslichkeitsgrenzen überschritten werden, wieder aus der Lösung ausfallen. Das FEP hat direkte Auswirkungen auf die Funktion von Strecken- und Schachtverschlüssen sowie auf das Wirtsgestein.

Das FEP setzt freie Lösungen im Grubenbau voraus. Diese stehen aber während der Standzeit der Barrieren nur in geringen Mengen zur Verfügung, so dass das FEP für die Entwicklung des Grubengebäudes von untergeordneter Bedeutung ist. Lediglich bei den Schachtverschlüssen wird von Anfang an ein Kontakt mit Deckgebirgswässern unterstellt. Kommt es nach Ablauf der geforderten Standzeiten durch Alteration und Versagen der Schachtverschlüsse zu einem Lösungszutritt zum Grubengebäude, so werden auch hier durch Wechselwirkungen zwischen den Lösungen und dem Gebirge sowie den Versatz-/Verschlussmaterialien Auflösungs- und Ausfällungsprozesse stattfinden. Eine großräumige Auflösung von anstehendem Salzgestein im Nahbereich des Endlagers ist sehr unwahrscheinlich, da sich die zutretenden Lösungen im thermodynamischen Gleichgewicht mit den anstehenden Salzen befinden werden: Lösungen aus Laugentaschen sind bereits salzgesättigt, über die Schächte zutretende Deckgebirgslösungen werden sich im Infrastrukturbereich aufsättigen. Eine Alteration von Barrieren durch diese Lösungen ist wahrscheinlich.



Das FEP hat – abgesehen von den Schachtverschlüssen – vor allem zu späten Zeiten eine Bedeutung für das FEP „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“, ist dann aber nicht mehr relevant für die Langzeitsicherheit.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Fluiddruck (2.1.07.03)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

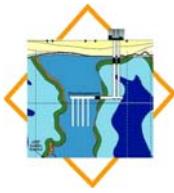
Wärmeproduktion (2.1.11.01)

7.) Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Das FEP beschreibt die Volumenzunahmen bzw. –abnahmen des Gebirges durch thermisch bedingte Expansion bzw. Kontraktion. Durch die resultierenden Gebirgsspannungen ergeben sich indirekte Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren.

Relevante Temperaturänderungen treten im Grubengebäude durch die abklingende Wärmeentwicklung der eingelagerten hochradioaktiven Abfälle sowie, im oberflächennahen Bereich, durch starke klimatische Veränderungen (z. B. Kaltzeit) auf.

Aus den Temperaturänderungen resultieren Verformungen und Spannungsänderungen im Gebirge, die sich auch auf alle geotechnischen Barrieren und die Eigenschaften der Verschlussmaterialien auswirken können. Dabei können neue Wegsamkeiten entstehen oder vorhandene sich verschließen. Die maximalen Temperaturen durch wärmeproduzierende Abfälle (Temperaturgrenzwert 200°C), die im Nahfeld der Einlagerungsbereiche auftreten, werden einige zehner Jahre nach der Einlagerung erreicht.



Die Temperaturerhöhung und die dadurch verursachte thermische Expansion und spätere Kontraktion des Gebirges im Zeitraum von mehreren Hundert bis Tausend Jahren im ganzen Endlagerbereich wirkt sich daher auch auf die Barrieren und die „Eigenschaften der Verschlussmaterialien“ aus.

Die erste Abkühlung und kontinuierliche Permafrost-Bildung infolge einer Kaltzeit wird ab ca. 50.000 Jahren erwartet und sich vor allem auf das Deckgebirge und die obersten zehner Meter des Wirtsgesteins auswirken. Da für die Schachtverschlüsse nur eine deutlich kürzere Standzeit gefordert wird, hat die Kaltzeit keine relevanten Auswirkungen mehr auf die Funktion dieser Barriere. Die Einwirkungen einer Kaltzeit sind daher für das FEP „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ nicht relevant.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Wärmeleitung (2.1.11.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Wirtsgestein (2.2.02.01)

8.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Die Spannungsänderungen beschreiben reversible Änderungen des Beanspruchungszustandes im Wirtsgestein und in geotechnischen Bauwerken, während Spannungsumlagerungen Ausgleichsprozesse mit irreversiblen Deformationen darstellen. Diese



Prozesse haben direkte Auswirkungen auf die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse sowie auf das einschlusswirksame Wirtsgestein.

Der teufenabhängige Gebirgsdruck führt zu Spannungsumlagerungen an der Hohlraumkontur des Grubengebäudes und damit zu einem durch die Auffahrung bedingten Sekundärspannungszustand. Entsprechend der gebirgsmechanischen Situation ist am Referenzstandort nach der Auffahrung des Grubengebäudes von dilatanten Gebirgsverformungen und somit von Spannungsumlagerungen unter Ausbildung einer Auflockerungszone auszugehen. Nach dem Verfüllen der Grubenräume beim Abwerfen gefüllter Einlagerungsbereiche bzw. nach dem Abschluss des Betriebes werden sich die Risse in der Auflockerungszone mit dem Fortschreiten der Salzgruskompaktion und der Ausbildung eines Stützdrucks wieder schließen.

Der Wärmeeintrag durch die Abfallgebinde intensiviert die Spannungsumlagerungen im Salzgebirge und die resultierende Konvergenz an der Hohlraumkontur. Dies fördert die Salzgruskompaktion und führt zu einem beschleunigten Einschluss der Abfallgebinde sowie zur konturbündigen Einspannung der Barrieren. Die Gasbildung infolge Behälterkorrosion sowie ein möglicher Lösungszutritt erhöhen den Fluiiddruck, der das Gebirge und die Barrieren belastet und nach Überschreiten der maximalen Druckfestigkeit zur Entstehung neuer Wegsamkeiten führen kann.

Das FEP ist wichtig für die Ausprägung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Verschlussmaterialien.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Fluiddruck (2.1.07.03)

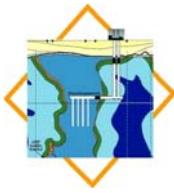
Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))



Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Versatzkompaktion (2.1.07.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

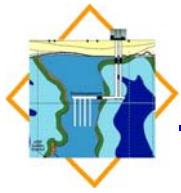
Wirtsgestein (2.2.02.01)

4.5.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

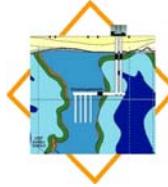
Die Eigenschaften von Verschlussmaterialien hängen von der Materialzusammensetzung ab und müssen die Anforderungen aus dem Langzeitsicherheitsnachweis, insbesondere bzgl. der Dichtheit und der Langzeitstabilität, erfüllen. Die beeinflussenden FEPs der Materialzusammensetzung wirken sich in gleicher Weise auf die Materialeigenschaften aus. Dies gilt für Fehler bei den Materialrezepturen und bei der Herstellung der Baumaterialien, die aufgrund entsprechender Qualitätssicherungsmaßnahmen aber unwahrscheinlich sind und im Referenzszenario nicht unterstellt werden. Zu späten Zeiten sind aber auch für das Referenzszenario ein Versagen eines Schachtverschlusses und ein Lösungszutritt aus dem Deckgebirge nicht auszuschließen. Falls diese Lösungen bis zu einem Streckenverschluss vordringen, kann es zur partiellen Auflösung des Baumaterials bzw. zur Ausfällung gelöster Stoffinventare im Porenraum kommen. Da der Versatz zu diesem Zeitpunkt keine signifikante hydraulische Leitfähigkeit mehr aufweist, hat diese späte Beeinflussung von Verschlussmaterialien aber keine Bedeutung mehr für den Langzeitsicherheitsnachweis.

Wichtige beeinflussende FEPs für die Eigenschaften der Verschlussmaterialien sind die Spannungsänderungen und –umlagerungen im Salzgebirge sowie resultierende Konvergenzen an der Hohlraumkontur, die in der Nachbetriebsphase zur Kompaktion des Versatzmaterials, zum Schließen der Risse in der Auflockerungszone und im Gebirge sowie zur Einspannung der geotechnischen Barrieren führen. Vor allem die durch die Zerfallswärme der Abfälle ausgelöste thermische Expansion und Kontraktion des Wirtsgesteins hat Auswirkungen auf die Barrieren und die Verschlussmaterialien, während die Bedeutung der klimatischen Einflüsse eher gering ist, da sie erst zu einem



späten Zeitpunkt auftreten, zu dem keine Anforderungen mehr an die Verschlussbauwerke bestehen.

Beim Lösungszutritt zum Grubengebäude infolge Versagen eines Schachtverschlusses zu späten Zeiten sind folgende FEPs relevant: „Lösungen im Grubenbau“, „Auflösung und Ausfällung“ sowie „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“. Diese beeinflussen die Eigenschaften von Verschlussmaterialien in unterschiedlicher Weise. Während durch Auflösung und Alteration die hydraulische Durchlässigkeit der Verschlussmaterialien erhöht wird, kann sie bei Ausfällungen durch Krustenbildung reduziert werden. Da dies alles zu einem Zeitpunkt erfolgt, zu dem der Salzgrusversatz so weit kompaktiert ist, dass er ein Vordringen von Lösungen zu den Einlagerungsbe reichen verhindert, sind die Prozesse nicht mehr relevant für die Langzeitsicherheit.



4.5

FEP Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

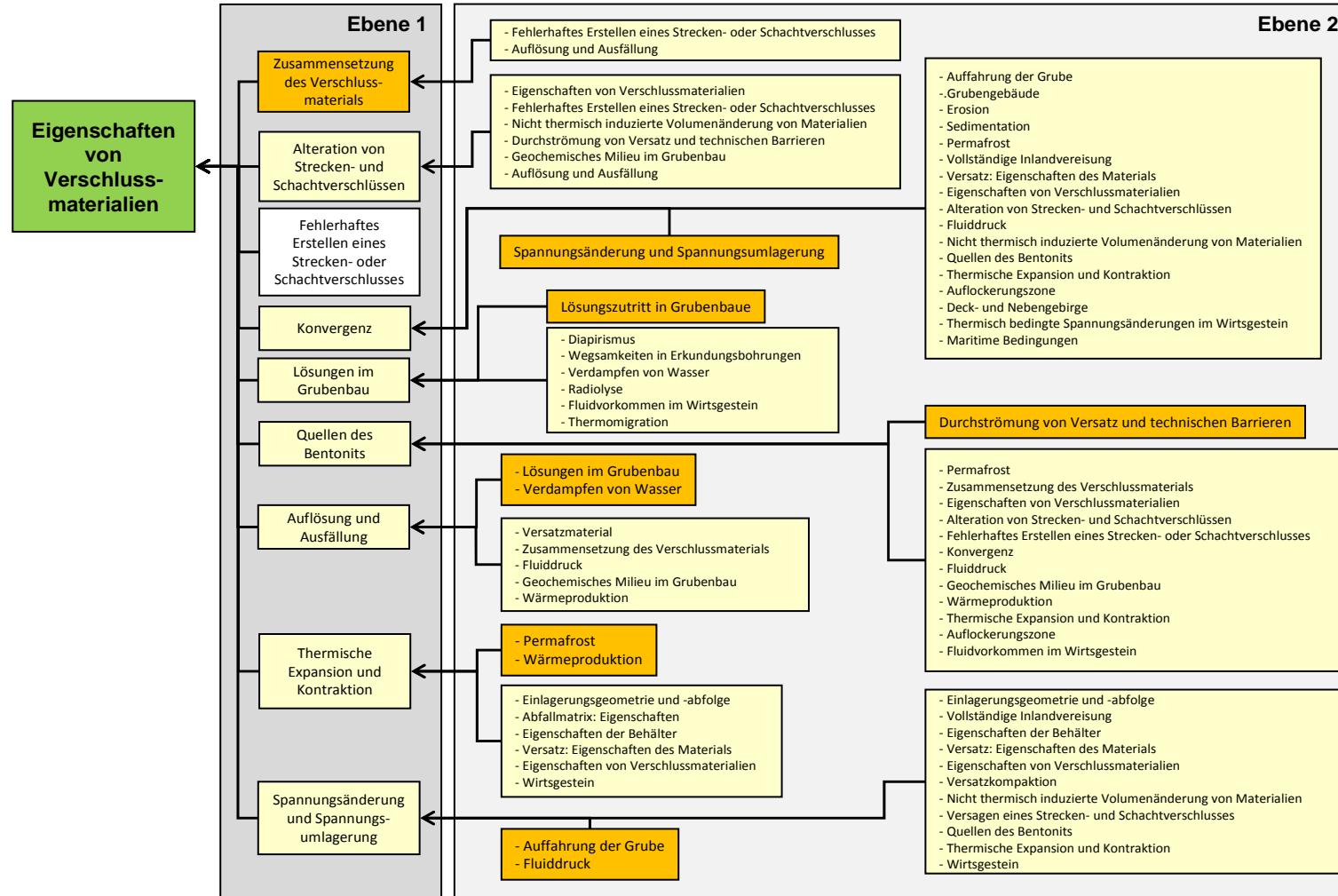
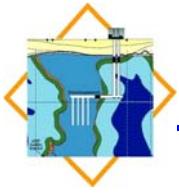


Abb. 6: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Eigenschaften von Verschlussmaterialien bis in die 2. Ebene.



4.6. FEP Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Dieses FEP beschreibt die Anpassung von Baustoffen an veränderte geochemische Umgebungsbedingungen über die Zeit. Da die Schachtverschlüsse auch bei der Normalentwicklung mit Grundwasser aus den oberen Deckgebirgsschichten in Kontakt kommen, ist bei diesen Verschlüssen in jedem Fall von einer Alteration auszugehen. Demgegenüber kann eine Alteration der Streckenverschlüsse durch Lösungen aus Laugentaschen oder zu späten Zeiten durch Versagen der Schachtverschlüsse und Lösungszutritt zum Grubengebäude eintreten.

Das FEP hat direkte Einwirkungen auf die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse.

4.6.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

Keine identifiziert

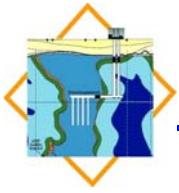
4.6.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

Die Eigenschaften von Verschlussmaterialien wirken sich direkt auf die Funktion und Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse aus.

Damit die Strecken- und Schachtverschlüsse ihre Funktion über die geforderte Standzeit und darüber hinaus bewahren können, werden von den Materialien der Abdichtungen folgende grundlegende Eigenschaften gefordert:

- Beständigkeit gegen salinare Wässer aus Einschlüssen des Wirtsgesteins oder gegen Deckgebirgslösungen, die über den Schacht zugetreten sind,
- Quellfähigkeit des Bentonits unter den vorherrschenden Endlagerbedingungen,
- ausreichende Beständigkeit gegen Versprödung durch ionisierende Strahlung,
- ausreichend geringe Durchlässigkeit von Dichtelementen in den Barrieren,



- Langzeitbeständigkeit der Materialien, damit die definierten Materialeigenschaften über die geplante Nutzungsdauer der Barrieren erhalten bleiben.

Ziel ist es, durch die Auswahl von Verschlussmaterialien mit entsprechenden Eigenschaften sicherzustellen, dass die Alteration der Barriere nicht zu einem teilweisen oder vollständigen Verlust der Barrierenintegrität vor Ablauf der geplanten Lebensdauer führt. Diesem Zweck dient auch die Diversifikation von Baumaterialien, wobei die aus unterschiedlichen Materialien bestehenden Barrierenelemente hinsichtlich ihrer Beständigkeit eine größere Bandbreite zukünftiger Lösungstypen abdecken.

Das FEP ist bedeutsam für das FEP „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“.

Das FEP wird bei der Revision des FEP-Kataloges mit dem FEP „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

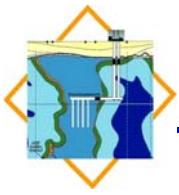
Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Spannungsänderungen und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)



2.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

3.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Volumenänderungen können durch Korrosion der Behältermaterialien sowie durch Austrocknung bzw. Durchfeuchtung von Barrierenmaterialien auftreten. Das FEP wirkt sich indirekt auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren aus.

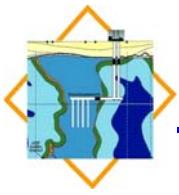
Relevante Volumenänderungen treten vor allem beim Quellen von Bentonit (Dichtmaterial in Schachtverschlüssen) auf. Die gleichmäßige Aufsättigung des Bentonits durch Wässer ist Voraussetzung für die Funktionalität der Dichtelemente.

Die Volumenänderungen durch Behälterkorrosion haben nur eine geringe Bedeutung. Sie werden durch die geringe Restfeuchte im Versatz und in den Behältern begrenzt. Auch die Volumenänderungen der Salz- oder Sorelbetone der Barrieren bei Lösungszutritt sind nur geringfügig, können aber bei entsprechender Einspannung im Gebirge den Spannungszustand beeinflussen und ggf. zu Rissbildungen führen. Risse in Betonbarrieren könnten die Alteration der Barrieren begünstigen. Das Risiko von Rissbildungen in der Barriere wird durch die angepasste Baustoffrezepteuren sowie durch Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung und Einbringung minimiert.

Bei einem unterstellten Versagen der Schachtverschlüsse zu späten Zeiten können die Volumenänderungen der Barrierenbaustoffe zwar die Alteration begünstigen, dies erfolgt jedoch erst zu Zeiten, wenn der Versatz hydraulisch undurchlässig ist. Daher wäre dann ein Versagen von Streckenverschlüssen nicht mehr sicherheitstechnisch relevant.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Quellen des Bentonits (2.1.08.08)
- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Matrixkorrosion (2.1.09.04)



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Organika (2.1.01.03)

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Konvergenz (2.1.07.01)

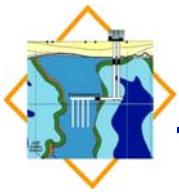
Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

4.) Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Die in einem Grubenbau vorhandenen Fluide können in Abhängigkeit von den vorherrschenden Potentialunterschieden die Resthohlräume des Grubengebäudes durchströmen. Wegsamkeiten für Fluide gibt es im Versatz, in den Porenräumen der technischen Bauwerke, in den Auflockerungszonen und im Porenraum der Abfallgebinde. Das FEP wirkt indirekt auf die Funktion einschlussswirksamer Barrieren ein.

Da bei der Referenzentwicklung während der Standzeit der Barrieren nur von geringen Lösungsmengen in den Grubenbauen auszugehen ist, ist ein hydraulischer Gradient lediglich an den Schachtverschlüssen zu betrachten. Die durchströmenden Flüssigkeitsmengen sind aber sehr gering und erreichen nicht die Einlagerungsfelder. Bei einem Versagen der Schachtverschlüsse zu späten Zeiten und einem anschließenden Lösungszutritt über den Schacht oder bei Lösungszutritten aus Laugentaschen sind Durchströmungen im gesamten Grubengebäude zu betrachten. Die Baustoffe der Barrieren sind entsprechend dem erwarteten Chemismus zutretender Wässer ausgewählt worden. Weicht der Chemismus der zutretenden Wässer von dieser Prognose ab, so kommt es beim Durchströmen der Barrieren zu Wechselwirkungen zwischen den Baustoffen und den Lösungen (Alteration).

Das FEP ist für die „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“ bei der Normalentwicklung während der Standzeit der Barrieren nur für die Schachtverschlüsse relevant, bei einem Lösungszutritt aus Laugentaschen oder bei einem Lösungszutritt aus dem Deckgebirge nach dem Versagen der Schachtverschlüsse zu späten Zeiten auch für die Streckenverschlüsse.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Fluiddruck (2.1.07.03)

Rissbildung (2.1.07.06) (Revision: geht in „Auflockerungszone“ (2.2.01.01) auf)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

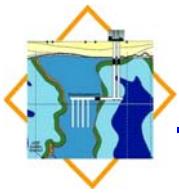
Lageverschiebung des Schachtverschlusses (2.1.07.08)

Permeabilität (2.1.08.02)

5.) Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Das geochemische Milieu charakterisiert die wässrige Lösung in einem Grubenbau und wird insbesondere durch den pH-Wert, die Ionenstärke, das Redoxpotential und die Konzentration der Hauptbestandteile der Lösung beschrieben.

Im Bereich der Schächte können sich bei Änderungen der Hydrogeologie infolge von Klimaänderungen und im Fall von Lösungszutritten zum Grubengebäude – je nach Chemismus der Lösungen – Änderungen im geochemischen Milieu ergeben. Eine andere Entwicklung, die zu Änderungen des geochemischen Milieus im Grubenbau führen kann, ist ein mögliches Versagen der Schachtverschlüsse nach Ablauf der Standzeit und ein Eindringen von Deckgebirgslösungen in die schachtnahen Gruberäume. Die Baustoffe der Verschlussbauwerke werden entsprechend den derzeitigen Standortbedingungen und dem zu erwarteten Chemismus der in Zukunft zutretenden Wässer ausgewählt. Änderungen des geochemischen Milieus führen zu Wechselwirkungen zwischen Lösungen und Baustoffen und können eine „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“ verursachen.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)

Inventar: Metalle (2.1.01.02)

Inventar: Organika (2.1.01.03)

Inventar: Sonstige Stoffe (2.1.01.04)

Abfallmatrix: Zusammensetzung (2.1.02.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Eigenschaften“ (2.1.02.02))

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften des Behälters“ (2.1.03.02))

Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Metallkorrosion (2.1.09.03)

Matrixkorrosion (2.1.09.04)

Zersetzung von Organika (2.1.10.01)

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Gasbildung (2.1.12.01)

Radiolyse (2.1.13.03)

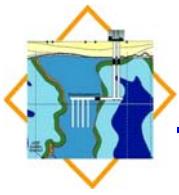
Wirtsgestein (2.2.02.01)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

Radionuklid-Mobilisierung (3.2.01.02)

Chemische Speziation (3.2.02.01)



Sorption, Desorption (3.2.03.01)

Kolloide (3.2.04.01)

Komplexbildung (3.2.05.01)

Diffusion (3.2.07.04)

6.) Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Bei Anwesenheit von Lösungen ist, je nach deren Chemismus, eine partielle Lösung des durchdrungenen Gebirges und der Baumaterialien sowie nach Überschreitung der Löslichkeitsgrenzen eine Ausfällung des gelösten Stoffinventars möglich. Daher hat dieses FEP direkte Auswirkungen auf alle einschlusswirksamen Barrieren.

Alle Barrieren werden gegen die Alteration durch mögliche zutretende Lösungen ausgelegt. Auch bei der ungestörten Endlagerentwicklung sind die Schachtverschlüsse von Anfang an im Kontakt mit Deckgebirgslösungen. Im Grubengebäude werden aufgrund der geringen Lösungsmengen nur in sehr begrenztem Umfang Auflösungs- und Ausfällungsprozesse auftreten. Erst wenn es zu späten Zeiten durch ein Versagen der Schachtverschlüsse zu einem Zutritt von Deckgebirgslösungen in das Grubengebäude kommen sollte, kann es in größerem Umfang zu Auflösungen am Gebirge sowie an Versatz- und Verschlussmaterialien bzw. bei Überschreitung der Löslichkeitsgrenzen zu Stoffausfällungen kommen.

Auflösung und Ausfällung sind wichtige Prozesse bei der „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

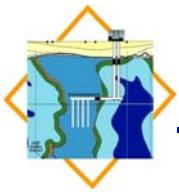
Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))



Fluiddruck (2.1.07.03)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

4.6.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

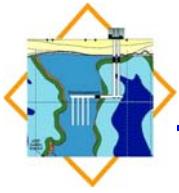
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Die Ausprägung der Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen wird im Wesentlichen durch drei FEPs bestimmt:

Die „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ bestimmen die Beständigkeit der Barrieren bei Lösungszutritt und unterschiedlichen geochemischen Milieus. Durch die Auswahl entsprechender Verschlussmaterialien und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei ihrer Herstellung und dem Einbau wird angestrebt, eine Alteration der Verschlussmaterialien zu begrenzen und zu verzögern. Diesem Zweck dient auch die Diversifikation von Baumaterialien, wobei die Kombination verschiedener Materialien eine größere Bandbreite zukünftiger Lösungsschemismen abdecken kann.

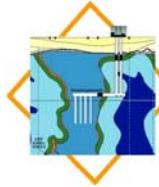
Da Wechselwirkungen zwischen Lösungen und Baustoffen die Voraussetzung für das Auftreten von Alterationen darstellen, ist das FEP „Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren“ wichtig für das Auftreten und die Ausprägung der Alterationen. Bei einer Normalentwicklung kommt es während der Standzeit der Barrieren nur im Bereich der Schachtverschlüsse zu geringen Durchströmungen, die aber die Einlagerungsbereiche nicht erreichen. Wenn es in der späten Nachbetriebsphase zum Versagen der Schachtverschlüsse und einem Lösungszutritt zum schachtnahen Grubengebäude kommen sollte, können dort, aber nicht mehr im Einlagerungsbereich, in geringem Umfang der stark kompaktierte Salzgrus-Versatz und die Streckenverschlüsse durchströmt werden.

Von entscheidender Bedeutung für die Langzeitstabilität der Barrierenbaustoffe ist das „geochemische Milieu im Grubenbau“. Bei Lösungszutritt kann sich das geochemische Milieu ändern. Im Zuge der geowissenschaftlichen Langzeitprognose wird abgeschätzt, welchen Chemismus zukünftig zutretende Lösungen haben werden. Doch ist aufgrund der Ungewissheiten dieser Langzeitprognose nicht auszuschließen, dass sich der Grundwasserchemismus anders entwickeln kann. In diesem Fall kann es zur Alteration von Barrierenmaterialien kommen.



Aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit werden „Fehler beim Erstellen eines Verschlussbauwerkes“ im Referenzszenario nicht unterstellt. Auch die „nicht thermisch induzierten Volumenänderungen von Materialien“ sind nur von geringer Bedeutung. Das Risiko von Rissbildungen in Barrieren wird durch an die Standortbedingungen angepasste Baustoffrezepturen sowie durch Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung und Einbringung minimiert.

Eine „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“ ist nur während der vorgesehenen Barrierenstandzeit sicherheitsrelevant. Für diese Zeit ist durch die technischen Vorsorgemaßnahmen die Funktion gewährleistet. Bei einem später nicht auszuschließenden Versagen von Barrieren durch Alteration wird der sichere Einschluss durch den kompaktierten Salzgrus und das Wirtsgestein gewährleistet.



4.6.

FEP Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

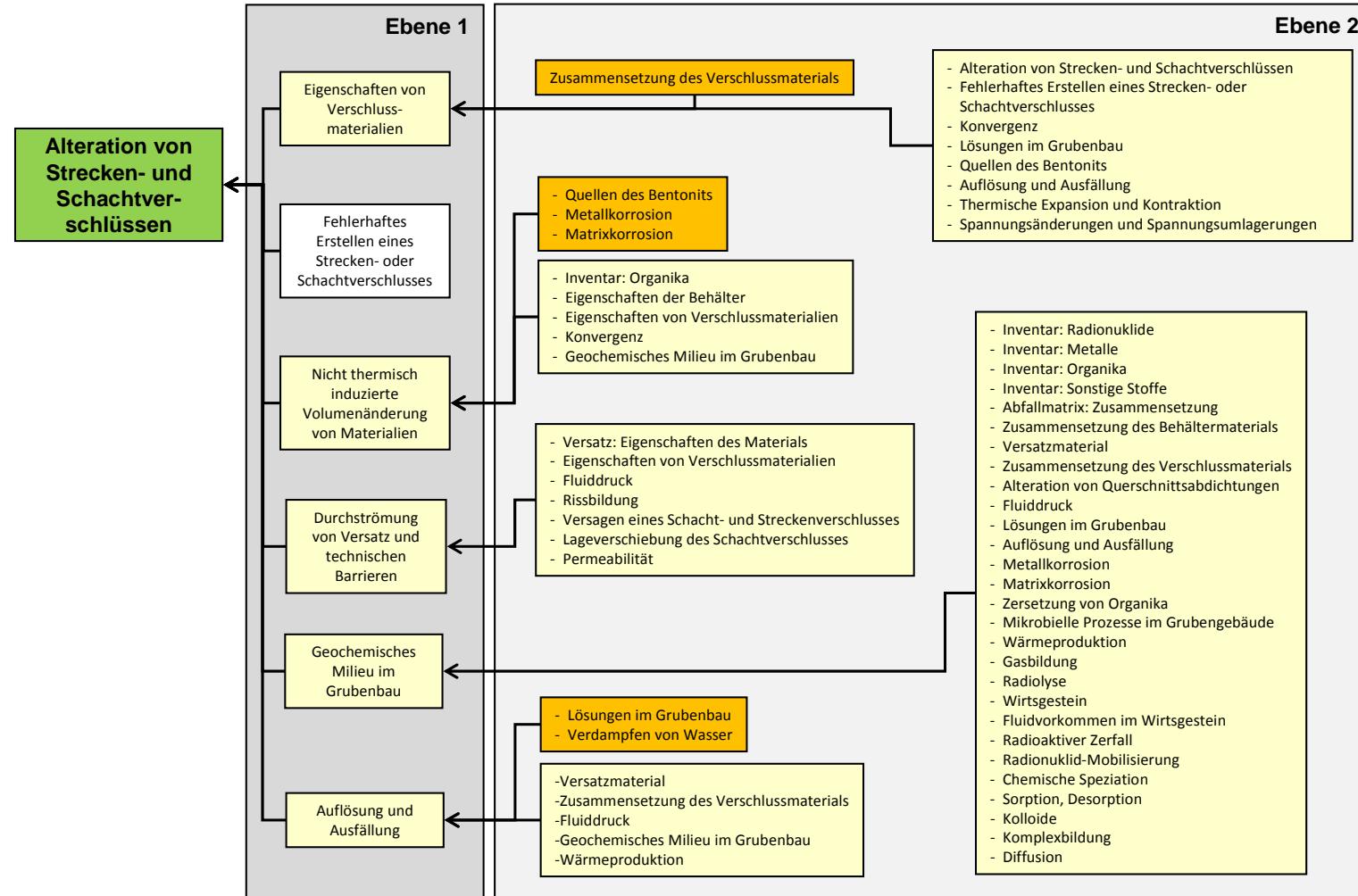
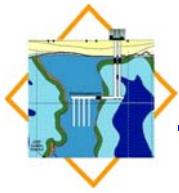


Abb. 7: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen bis in die 2. Ebene.



4.7. FEP Konvergenz (2.1.07.01)

Konvergenz bezeichnet die Querschnittsverkleinerung von Grubenräumen durch das Salzkriechen, das durch Spannungsumlagerungen nach der Auffahrung der Grubenräume ausgelöst wird. Dieser Prozess wirkt sich direkt auf die Funktion aller einschlusswirksamen Barrieren aus.

4.7.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Dieses FEP beschreibt Änderungen im Beanspruchungszustand des Gebirges sowie Spannungsausgleichsprozesse zwischen unterschiedlich hoch beanspruchten Gebirgsbereichen mit irreversiblen Deformationen. Auf die an der Hohlraumkontur von Grubenräumen und im angrenzenden Gebirge wirkenden Spannungen reagiert das Salz mit plastischen oder – nach Überschreitung der Dilatanzgrenze – bruchhaften Verformungen (Konvergenz). Das FEP wirkt direkt auf die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse sowie des Wirtsgesteins ein.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Versatzkompaktion (2.1.07.04)



Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Quellen des Bentonits (21.08.08.)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

4.7.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Die „Auffahrung der Grube“ umfasst die Erstellung des Endlagerbergwerks. Es stellt eine Randbedingung dar, die sich unmittelbar auf die Funktion der Barriere Wirtsgestein auswirkt.

Die durch die Auffahrung ausgelösten Spannungsumlagerungen im Gebirge führen zu dilatanten Deformationen an den Hohlraumkonturen, die mit der Entwicklung einer Auflockerungszone rund um die Hohlräume des Grubengebäudes und der Konvergenz verbunden sind.

Das FEP wirkt sich mittelbar auf die Entstehung der „Konvergenz“ aus.

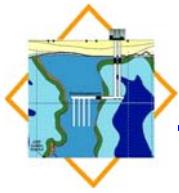
Da das FEP nicht unmittelbar für den Sicherheitsnachweis relevant ist, entfällt es bei der Revision des FEP-Kataloges. Die durch die Auffahrung ausgelösten relevanten Prozesse werden in anderen FEPs beschrieben.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.



2.) Grubengebäude (1.1.02.03)

Das FEP „Grubengebäude“ beschreibt sämtliche Eigenschaften des Grubengebäudes des Endlagerbergwerks. Es stellt eine Randbedingung dar, die keine Auswirkung auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren hat.

Untersuchungen am Referenzstandort zeigen, dass die Konvergenz außer durch die Mineralogie der verschiedenen Salzformationen (vor allem den Anhydrit-Anteil) auch durch die Intensität der Störung der Gebirgsspannungsverhältnisse infolge der Geometrie der Grubenräume beeinflusst wird. Dabei sind die Konvergenzraten in großen Grubenräumen (bei gleicher Geologie) höher als in kleinen Grubenräumen. Aufgrund des geringeren Hohlraumvolumens werden diese in der Nachbetriebsphase jedoch schneller verschlossen sein als die großen Grubenräume. Dies ist wichtig für die Einlagerungsbereiche, da der Verschluss der mit Salzgrus verfüllten Einlagerungsbohrlöcher dadurch noch während der Betriebsphase weitgehend abgeschlossen ist.

Das FEP ist indirekt für die „Konvergenz“ von Bedeutung.

Da das FEP nicht unmittelbar für den Sicherheitsnachweis von Bedeutung ist, entfällt es bei der Revision des FEP-Kataloges. Die durch das Grubengebäude ausgelösten relevanten Prozesse werden in anderen FEPs beschrieben.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Diapirismus (1.2.09.01)

Konvergenz (2.1.07.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

3.) Erosion (1.2.07.01)

Das FEP „Erosion“ umfasst alle Prozesse, die zur Abtragung des Boden- und Gesteinsmaterials an der Erdoberfläche beitragen. Eine tiefgreifende glaziale Erosion



kann bei entsprechender Abtragung des Deckgebirges direkte Auswirkungen auf die oberen Bereiche des Salzstocks und die Funktion der Schachtverschlüsse haben.

Die normale flächenhafte Erosion würde in der tektonisch ruhigen Referenzregion mit geringem Relief nur zu einer geringen Reduzierung der Deckgebirgsmächtigkeit führen. Durch Gletscherschurf und Schmelzwässer, während einer in ca. 100.000 Jahren auftretenden Kaltzeit, kann eine verstärkte Erosion entstehen, die zu einer Entlastung der gesamten Salzstruktur führt. Die resultierenden Spannungsänderungen dürften sich nur geringfügig auf die Konvergenz im Grubengebäude auswirken, da diese mit fortschreitender Salzgruskompaktion bereits weitgehend zum Erliegen gekommen ist.

Die Relevanz dieses FEP ist daher für die „Konvergenz“ gering.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

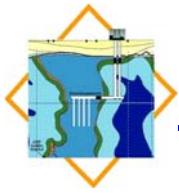
- Permafrost (1.3.04.01)
- Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Transgression/Regression (1.3.03.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)
- Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)
- Veränderung des Ökosystems aufgrund Klimawandel (1.3.08.01) (Revision: entfällt)*
- Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01) (Revision: entfällt)*
- Topographie und Morphologie (2.3.01.01)
- Oberflächengewässer (2.3.04.01)
- Maritime Bedingungen (2.3.06.01) (Revision: entfällt)*

4.) Sedimentation (1.2.07.02)

Das FEP beschreibt den Prozess der Ablagerung anorganischer und organischer Materialien in Abhängigkeit von der Absenkungsgeschwindigkeit und anderen Einflüssen an der Erdoberfläche. Es besteht keine direkte Einwirkung auf die Funktion der ewB.



Eine zusätzliche Auflast durch neue Sedimentschichten würde sich auch auf den Salzstock übertragen. Die derzeitigen und für die Zukunft prognostizierten Sedimentationsraten am Referenzstandort sind aber sehr gering. Daher wird die Erhöhung des Überlagerungsdrucks mit entsprechend veränderten Spannungsverhältnissen im Wirtsgestein nur sehr langsam wirksam. Ein Einfluss auf die Konvergenz und die Kompaktion des Versatzes am Beginn der Nachbetriebsphase ist daher nicht zu unterstellen.

Das FEP ist für die „Konvergenz“ im Grubengebäude nicht relevant.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Transgression/Regression (1.3.03.01)
- Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

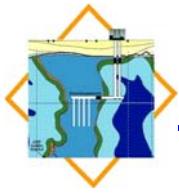
- Lokale Differenzialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)
- Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)
- Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01) (Revision: entfällt)*
- Topographie und Morphologie (2.3.01.01)

5.) Permafrost (1.3.04.01)

Wenn der Referenzstandort während einer Kaltzeit nicht von Gletschern bedeckt ist, kann sich dauerhaft ein Permafrostboden mit einer Mächtigkeit von 150 - 200 m bilden. Das FEP hat direkte Auswirkungen auf die Funktion der Schachtverschlüsse und auf das Wirtsgestein.

Da die Abkühlung durch den Permafrost nur die oberflächennahen Teile des Salzstocks betrifft, sind Auswirkungen auf die Spannungsverhältnisse im Niveau des Endlagerbergwerks nicht zu erwarten.

Das FEP ist somit für die „Konvergenz“ im Grubengebäude nicht relevant.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderung (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)

6.) Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Bei einer zukünftigen Kaltzeit kann es zu einer vollständigen Überdeckung des Referenzstandortes mit Inlandeis kommen. Die dadurch verursachten Lagerungsstörungen können bis in Tiefen von 100 - 150 m reichen. Das FEP kann sich somit direkt auf die Funktion der Schachtverschlüsse und auf die obersten Bereiche des Wirtsgesteins auswirken.

Für die nächste Kaltzeit wird keine Inlandeisüberfahrung des Referenzstandortes erwartet, für spätere Kaltzeiten (nach 100.000 Jahren) aber nicht ausgeschlossen. Bei einer Inlandeisüberfahrung ändern sich in Abhängigkeit von der Mächtigkeit des überlagernden Gletschers die Spannungsverhältnisse im Salzstock. Zu dem erwarteten Eintrittszeitpunkt ist die Konvergenz im Grubengebäude aber bereits zum Erliegen gekommen.

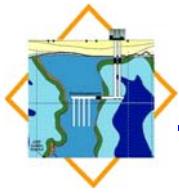
Das FEP ist daher für die „Konvergenz“ nicht relevant.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderung (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.



7.) Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02)

Für das Referenzkonzept ist eine Verfüllung der Grubenräume mit Salzgrus vorgesehen. Das FEP stellt eine Randbedingung dar und hat keine Auswirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren.

Ziel der Einbringung des Salzgrus-Versatzes ist es, dass er durch Kompaktion die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des umgebenden Wirtsgesteins annimmt und dann langfristig den vollständigen Einschluss der Abfälle gewährleistet. Wesentlicher auslösender Faktor für die Versatzkompaktion ist die Konvergenz. Umgekehrt wird die Konvergenz durch den mit fortschreitender Kompaktion zunehmenden Stützdruck des Versatzes gebremst.

Das FEP ist von großer Bedeutung für die „Konvergenz“ im Grubengebäude.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Versatzmaterials“ und „Versatz: Eigenschaften des Materials“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Konvergenz (2.1.07.01)
- Versatzkompaktion (2.1.07.04)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Radiolyse (2.1.13.03)

8.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

Die Verschlussmaterialien werden entsprechend den Anforderungen an die mechanischen, chemischen und hydraulischen Eigenschaften ausgewählt, die sich aus dem



Langzeitsicherheitsnachweis ableiten. Die Eigenschaften der Verschlussmaterialien wirken sich direkt auf die Funktion von Strecken- und Schachtverschlüssen aus.

Verschlussbauwerke werden konturschlüssig in die Grubenräume eingebaut, wodurch das Salzgebirge nach kurzer Zeit durch die Konvergenz auf die Barriere aufläuft und eine Einspannung bewirkt. Die weitere Konvergenz wird dann durch den Stützdruck behindert. Wenn Barrieren durchströmt werden, kann es zum Quellen der Baumaterialien kommen. Dadurch wird ein Druck auf das umgebende Gebirge ausgelöst und die weitere Konvergenz verhindert.

Da der Stützdruck der Barrieren nur kleinräumig wirkt, hat das FEP nur eine begrenzte Bedeutung für die „Konvergenz“ im Grubengebäude.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ und „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)



9.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Bei einem Lösungszutritt zum Grubengebäude kann es zu Änderungen des geochemischen Milieus kommen. Je nach Auswahl der Verschlussmaterialien können diese in einem geänderten geochemischen Milieu instabil werden. Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen wirkt sich direkt auf deren Funktion aus.

Durch eine Alteration der Baustoffe kann auch die mechanische Stabilität der Barriere beeinträchtigt werden. Dann können durch den Gebirgsdruck, der als Konvergenz auf die Barriere einwirkt, Risse und Wegsamkeiten in der Barriere entstehen.

Da sich die „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“ nur geringem Umfang und punktuell auf die Gebirgsspannung auswirkt, ist das FEP für das FEP „Konvergenz“ nur von geringer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

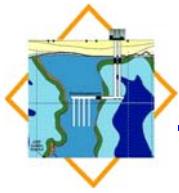
Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

10.) Fluiaddruck (2.1.07.03)

Der Fluiaddruck bezeichnet den an einem Referenzpunkt im Grubengebäude herrschenden Gas- bzw. Lösungsdruck. Es handelt sich um eine Randbedingung, die direkt auf alle einschlusswirksamen Barrieren wirkt.



Zwischen Konvergenz und Fluiaddruck besteht eine enge Wechselwirkung. So führt einerseits die Konvergenz zu einer Komprimierung von Gasen, andererseits wirkt der Fluiaddruck in den Poren als Stützdruck, der der Konvergenz entgegenwirkt.

Das FEP ist für die Ausprägung der „Konvergenz“ von großer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Konvergenz (2.1.07.01) (zusätzlich aufgenommen s. a. Kapitel 4.8.2)

Versatzkompaktion (2.1.07.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

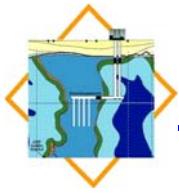
Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)

Gasvolumen (2.1.12.03)

Imprägnierung (2.1.12.06) (Revision: geht in „Gasfiltration ins Salzgestein“ (2.2.11.01) auf)

11.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Das FEP umfasst das Quellen oder Schrumpfen von Versatz und Baumaterialien sowie die Volumenzunahme durch Behälterkorrosion. Dies wirkt sich indirekt auf die Funktion der ewB aus. Die resultierenden Prozesse, wie z. B. die Rissbildung, haben dann direkte Einwirkungen auf die Barrieren.



Die Volumenzunahme von Baumaterialien wirkt der Konvergenz entgegen. Abgesehen vom Quellen des Bentonits führen alle anderen Prozesse nur zu geringfügigen Volumenänderungen und haben daher nur geringe Auswirkungen auf die Gebirgsspannungen. Die Quelldrücke des Bentonits werden durch entsprechende Materialrezepturen soweit begrenzt, dass keine Schädigung des Gebirges auftritt.

Das FEP ist nur im Bereich der Schächte durch das „Quellen des Bentonits“ für die „Konvergenz“ von geringer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Quellen des Bentonits (2.1.08.08)
- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Matrixkorrosion (2.1.09.04)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Inventar: Organika (2.1.01.03)
- Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))*
- Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))*
- Konvergenz (2.1.07.01)
- Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

12.) Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Der in Dichtelementen von Schachtverschlüssen verwendete Bentonit quillt bei Wasserkontakt auf. Das FEP hat also direkte Einwirkung auf die Funktion von Schachtverschlüssen und Wirtsgestein.

Das Quellen des Bentonits ist wichtig für die Funktionalität der Barriere, da es die Einspannung des Dichtelementes sowie einen Druckaufbau in der Kontaktfuge zwischen Dichtelement und Gebirge bewirkt. Der Quelldruck kann durch die Baustoffrezeptur so eingestellt werden, dass keine Schädigungen des angrenzenden Gebirges auftreten.



Es wird sich am Kontakt ein Druckgleichgewicht zwischen Barriere und Wirtsgestein einstellen.

Da das Quellen des Bentonits nur geringe Auswirkungen auf das Gebirge hat, ist die Bedeutung für das FEP „Konvergenz“ gering.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

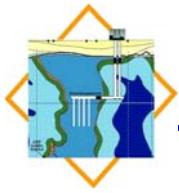
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

13.) Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Eine signifikante Expansion oder Kontraktion des Gebirges ergibt sich in der frühen Nachbetriebsphase durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und in späteren Zeiten durch Klimaänderungen (Kaltzeiten). Diese Volumenänderungen können sich indirekt auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren auswirken.



Während die Auswirkungen von Klimaänderungen nur für den Schachtbereich relevant sind, wirkt sich die Aufheizung durch wärmeentwickelnde Abfälle vor allem im Umfeld der Einlagerungsfelder, längerfristig aber auch bis zum Salzspiegel aus. In der frühen Nachbetriebsphase führt die Aufheizung durch Spannungsänderungen im Wirtsgestein zu einer erhöhten Konvergenz und Salzgruskompaktion.

Aufgrund der mechanischen Auswirkungen im Wirtsgestein ist das FEP für die „Konvergenz“ von wesentlicher Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

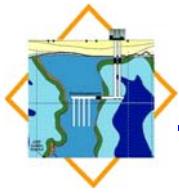
Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Wirtsgestein (2.2.02.01)

14.) Auflockerungszone (2.2.01.01)

Die Auflockerungszone ist ein geschädigter Bereich an der Grubenraumkontur, der durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes des Gebirges und die resultierenden Spannungsumlagerungen entstanden ist. Das FEP hat direkte Auswirkungen auf die Funktion der geotechnischen Barrieren.



Die Risse der Auflockerungszone werden durch die Konvergenz zunächst im Bereich der geotechnischen Barrieren, später auch in den Bereichen mit kompaktiertem Versatz verheilen. Dabei erfahren die Risse zunächst eine mechanische Kompression, die zu deren Schließen führt. Aufgrund von Rauhigkeiten werden vorhandene Resthohlräume dabei durch das Salzkriechen aufgefüllt. Ein vollständiges Schließen setzt voraus, dass mögliche Fluide aus den Rissen entweichen können.

Da die Auflockerungszone eine konturnahe, druckentlastete Zone darstellt, beeinflusst sie die „Konvergenz“, die aus den Gebirgsspannungen resultiert, nur gering.

Nach der Revision wird das FEP „Rissbildung“ (2.1.07.06) in der Version 2 des FEP-Kataloges inhaltlich eingegliedert.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Rissbildung (2.1.07.06) (Revision: entfällt)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

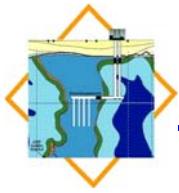
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

15.) Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Dieses FEP stellt eine Randbedingung dar und umfasst alle Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges einschließlich der gebirgsmechanischen Situation. Eine direkte Einwirkung auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren besteht nicht.



Die geomechanischen Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges bestimmen die Gebirgsspannungen und damit letztlich die Konvergenzen in den oberen Teilen der Schächte. Da sich diese Schachtbereiche oberhalb der Schachtverschlüsse befinden, sind sie für die Langzeitsicherheit nicht relevant.

Das Deck- und Nebengebirge ist für das FEP „Konvergenz“ nur von untergeordneter Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Lokale Differentialbewegungen im Deck- und Nebengebirge (1.2.02.01)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Diapirismus (1.2.09.01)

Permafrost (1.3.04.01)

Inlandvereisung in randlicher Lage (1.3.05.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

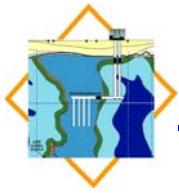
Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

Störungen und Störungszonen (2.2.04.01)

16.) Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Das FEP umfasst die Spannungsänderungen im Wirtsgestein infolge Erwärmung durch den wärmeentwickelnden Abfall bzw. durch die spätere Abkühlung aufgrund nachlassender Wärmeproduktion oder infolge Abkühlung durch klimatischen Einfluss. Das FEP hat eine direkte Einwirkung auf die Barriere Wirtsgestein.

Für die Konvergenz sind vor allem die Gebirgsspannungen relevant, die sich aus der Erwärmung durch die wärmeentwickelnden Abfälle ergeben. Diese Erwärmung führt zur Ausdehnung des Wirtsgesteins im Nahbereich der Einlagerungsfelder und zu zughaften Entlastungen des Wirtsgesteins im weiteren Umfeld. In-situ-Versuche, z. B. im Rahmen des BAMBUS-Projektes (BECHTHOLD, W., ROTHFUCHS, T. et al. 1999 und



BECHTHOLD, W., SMAILOS, E. et al. 2004), haben gezeigt, dass die erhöhten Temperaturen der Einlagerungsfelder zu einem beschleunigten Salzkriechen und damit zu einer erhöhten Konvergenzrate führen. So verursacht eine Temperaturerhöhung von 10 K im Temperaturbereich zwischen 20°C und 50°C bei einer Differenzspannung von 10 MPa eine Erhöhung der stationären Kriechrate um den Faktor 4 bis 5. Bei höheren Temperaturen ist dieser Faktor kleiner, bei kleineren Spannungen größer. Durch die beschleunigte Konvergenz läuft auch die Salzgrus-Kompaktion schneller ab und die Abfallgebinde werden rascher im Salz eingeschlossen.

Klimatische Änderungen mit Bildung eines Permafrostbodens können sich nur auf die obersten Bereiche des Wirtsgesteins auswirken und sind daher für die Konvergenz im Grubengebäude nur von geringer Bedeutung (lediglich für die Schächte).

Die thermisch bedingten Spannungsänderungen durch wärmeentwickelnde Abfälle sind während der frühen Nachbetriebsphase für die Konvergenz im Grubengebäude wichtig.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Wärmebildung (2.1.11.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

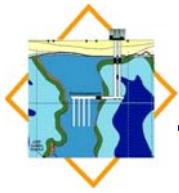
Permafrost (1.3.04.01)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

17.) Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

Das FEP beschreibt Bedingungen bei einer Überflutung des Referenzstandortes durch das Meer. Dieses Ereignis hätte indirekte Auswirkungen auf die Funktion der ewB.

Eine Überflutung des Referenzstandortes könnte sich infolge einer globalen Klimawärzung mit dem Abschmelzen der großen Inlandeisgletscher in der Antarktis und in Grönland ergeben. Dabei würde das Gebirge in Abhängigkeit von der als Auflast wirkenden Wassersäule eine Druckerhöhung erfahren. Daraus resultieren Veränderungen



der Spannungsverhältnisse im Wirtsgestein. Falls zum Zeitpunkt dieser Entwicklung noch Resthohlräume im Grubengebäude vorhanden sind, würde sich die Konvergenz in diesen Bereichen erhöhen.

Die Relevanz dieses FEP für die Konvergenzentwicklung hängt in erster Linie vom Zeitpunkt einer entsprechenden Klimaentwicklung ab. Bei einem frühen Eintreten ist das FEP für die „Konvergenz“ relevant, bei einem späten nicht.

Das FEP „Maritime Bedingungen“ wird bei der Revision des FEP-Kataloges entfallen, da die Auswirkungen eines möglichen Meeresspiegelanstiegs im FEP „Transgression/Regression“ (1.3.03.02) behandelt werden.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Transgression/Regression (1.3.03.01)

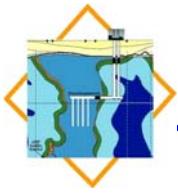
Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

4.7.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Konvergenz (2.1.07.01)

Die Konvergenz wird durch „Spannungsänderungen und –umlagerungen“ ausgelöst, die aus der Störung des Primärspannungszustandes durch die Auffahrung der Grube resultieren.

Sobald Einlagerungsbohrlöcher, -strecken und –felder mit Abfällen befüllt sind, werden die Resthohlräume mit Salzgrus verfüllt und abgeworfen. Zum Ende der Betriebsphase werden die restlichen Grubenräume 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 Abschluss der Versatzkompaktion 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 Versatzes zum Erliegen kommt. Lokal wird außerdem durch die Verschlussbauwerke ein Stützdruck auf das umgebende Gebirge ausgeübt.

Da die Brennstabkokillen nicht gegen den Gebirgsdruck ausgelegt sind, kann ihre Integrität durch die Konvergenz der Einlagerungsbohrlöcher zerstört werden.

In der frühen Nachbetriebsphase werden die Einlagerungsbereiche und die angrenzenden Grubenräume durch die Zerfallswärme der eingelagerten radioaktiven Abfälle aufgeheizt. Die dadurch initiierte thermische Expansion des Salzgestein sowie die resultierenden Spannungsänderungen im Wirtsgestein führen zu einer deutlichen Beschleunigung der Konvergenz. Nach Abklingen der Aufheizung durch die Zerfalls-wärme kommt es durch Abkühlung und Kontraktion des Gesteins zu Spannungsänderungen. Gleichzeitig reduziert sich die Konvergenz im Grubengebäude.

Gesteinskontraktionen durch Kaltzeiten wirken sich nur im Deckgebirge und in den obersten Bereichen des Salzstocks aus und sind somit nur für die Schächte relevant. Eine tiefreichende Abkühlung der Gesteine ist in erster Linie während Kaltzeitphasen mit der Bildung von Permafrost zu erwarten. Das resultierende Abklingen der Konvergenz und eine mögliche Beeinträchtigung der Schachtverschlüsse durch Kontraktionsrisse haben keinerlei sicherheitstechnische Bedeutung, da sie zu einem so späten Zeitpunkt auftreten werden (ab ca. 50.000 Jahre), dass keine Anforderungen mehr an die Stabilität der Schächte bestehen.

Eine weitere Entwicklung am Standort, die sich auf die Spannungsbedingungen im Wirtsgestein auswirken kann, ist eine Überflutung durch das Meer, die z. B. Folge einer globalen Klimaerwärmung sein könnte. Dabei erfährt das Gebirge durch die als Auflast wirkende Wassersäule eine Druckerhöhung. Sofern zu diesem Zeitpunkt noch Rest-hohlräume im Grubengebäude vorhanden sind würde sich die Konvergenz leicht erhöhen.

Aus den auslösenden und beeinflussenden FEPs der 2. Ebene ergeben sich als weitere indirekte Einflussfaktoren auf die Konvergenz die Einlagerungsgeometrie und -abfolge, die Eigenschaften der Behälter sowie des Versatz- und Verschlussmaterials, die Versatzkompaktion und das Wirtsgestein.



4.7. FEP Konvergenz (2.1.07.01)

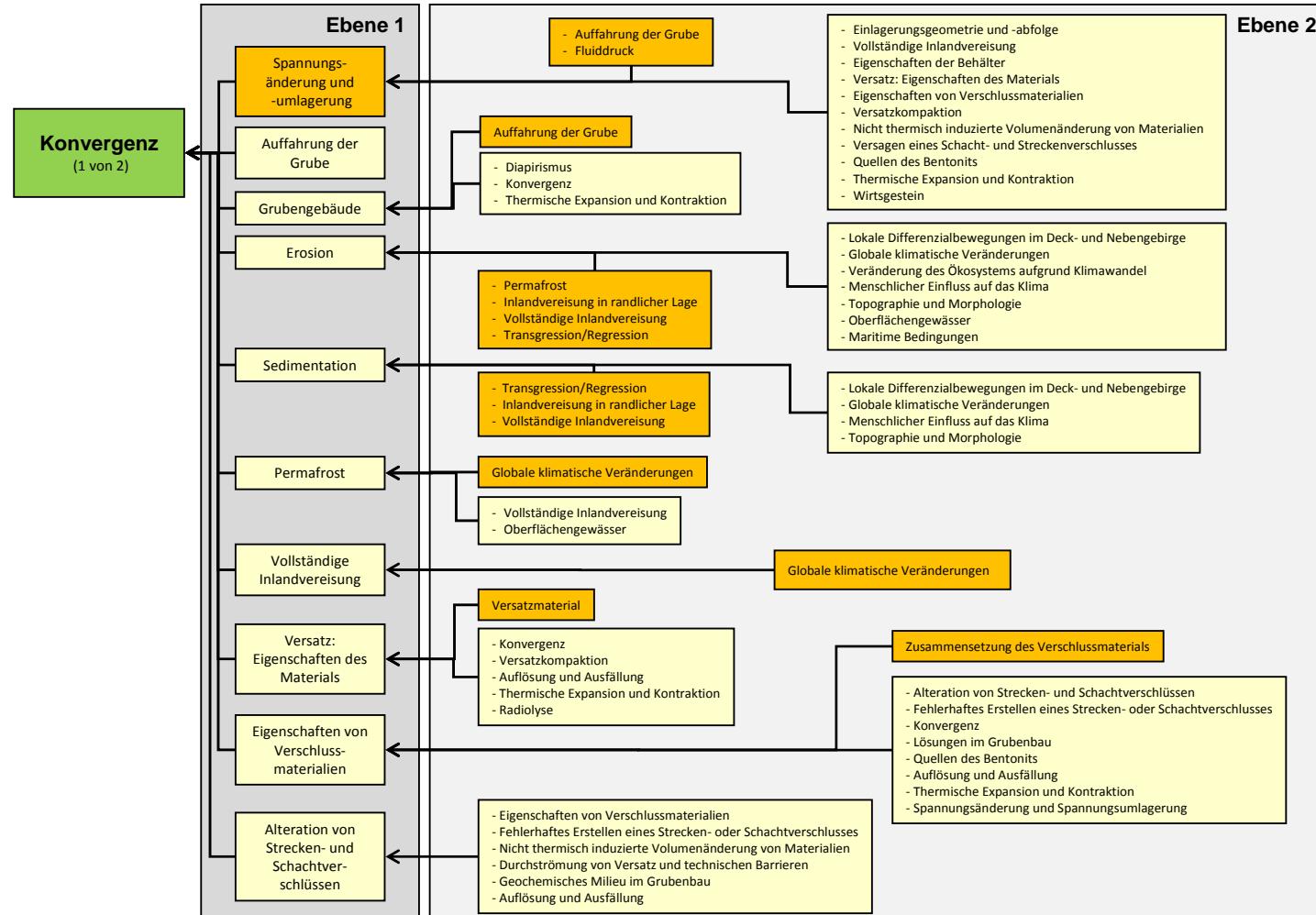


Abb. 8: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Konvergenz (Teil 1) bis in die 2. Ebene.



4.7. FEP Konvergenz (2.1.07.01)

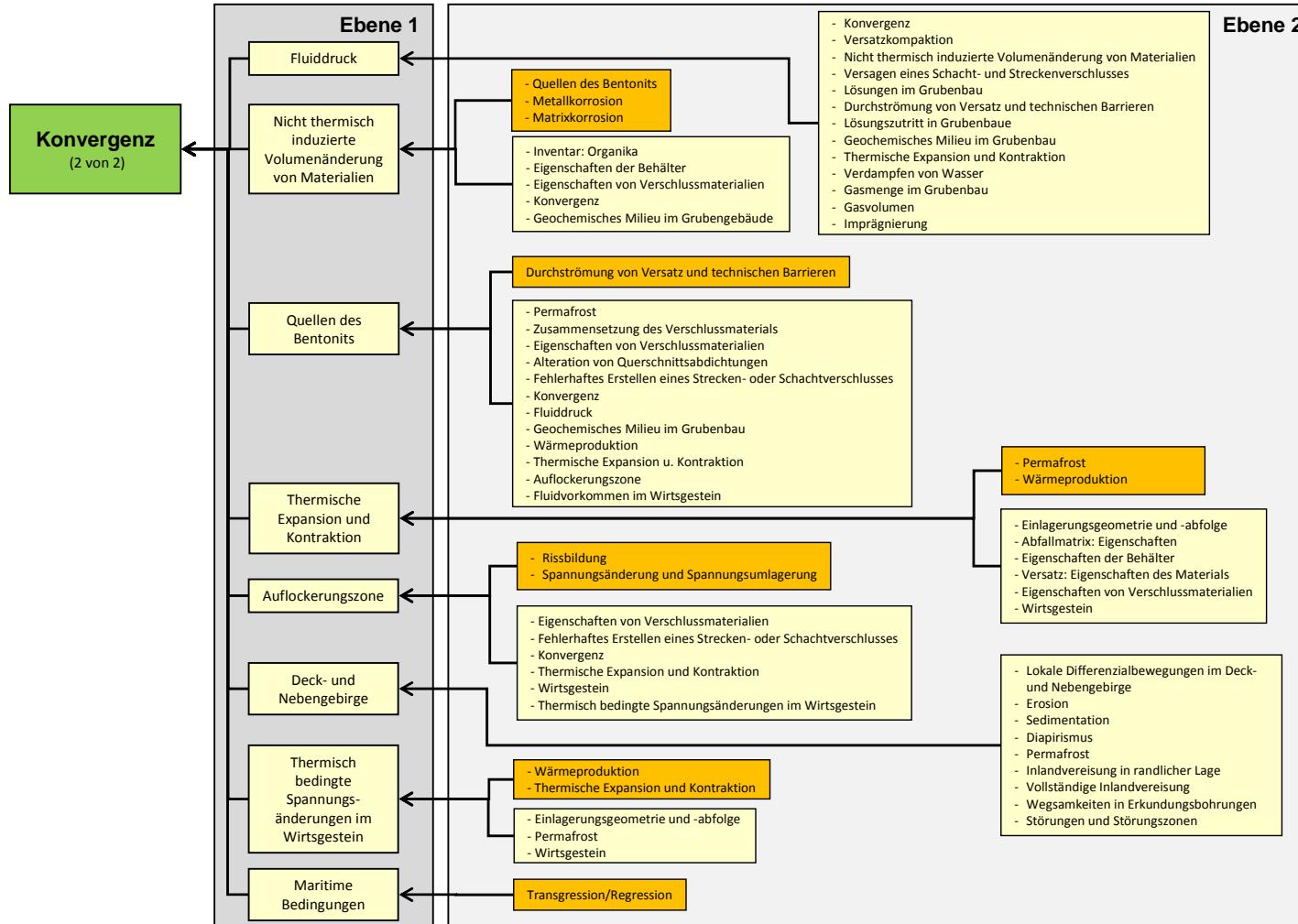
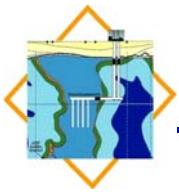


Abb. 9: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Konvergenz (Teil 2) bis in die 2. Ebene.



4.8. FEP Fluiddruck (2.1.07.03)

Der Fluiddruck hat direkte Einwirkung auf die einschlussswirksamen Barrieren Wirtsgestein und Strecken- und Schachtverschlüsse. Er wird in allen Teilsystemen außer dem Deck- und Nebengebirge berücksichtigt.

Fluiddruck wirkt als Stützdruck direkt der Konvergenz entgegen. Erhöhte Fluiddrücke im Grubenbau führen daher zu einer Verlangsamung der Kompaktion von Versatz. Durch die Vergrößerung des Porendrucks kommt es auch zu einer Verlangsamung von Schädigungs- und Dilatanzrückbildungsprozessen. Die Konvergenz des Wirtsgesteins verursacht in der Nachbetriebsphase einen Druckaufbau in den übriggebliebenen Hohlräumen.

Für das Referenzszenario wird davon ausgegangen, dass nur geringe Feuchtemengen im Grubengebäude auftreten. Nur in den Endlagerbereichen direkt am Schachtverschluss ist über einen zu betrachtenden Zeitraum von einer Million Jahren mit einem Zufluss von Grundwasser zu rechnen. Der Fluiddruck entspricht im restlichen Teil des Grubengebäudes dem Gasdruck der eingeschlossenen Luft, er wird gegebenenfalls durch zuströmende oder gebildete Gase erhöht. Fluiddrücke oberhalb des lithostatischen Drucks (damit ist die minimale Hauptnormalspannung des Spannungszustandes im Untergrund gemeint) sind gemäß den Prämissen im Referenzszenario nicht zu erwarten.

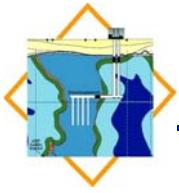
4.8.1. Auslösende FEPs für Fluiddruck (1. Ebene)

Keine identifiziert.

4.8.2. Beeinflussende FEPs für Fluiddruck (1. Ebene)

1.) Konvergenz (2.1.07.01)

Die Konvergenz hat einen großen Einfluss auf den Fluiddruck und ist in jedem Fall zu betrachten. Zwischen Konvergenz und Fluiddruck besteht eine enge Wechselwirkung. Die Konvergenz komprimiert die vorhandenen Fluide, der erhöhte Fluiddruck wirkt auf der anderen Seite der Konvergenz entgegen.



In der Version 2 des FEP-Kataloges wird auch die „Konvergenz“ als direkt beeinflussendes FEP gesehen. Im FEP-Katalog Version 1 ist ein indirekter Einfluss der Konvergenz über das FEP „Versatzkompaktion“ vorgesehen. Da diese Änderung auf die Beschreibung des Referenzszenarios Auswirkungen hat, wird die „Konvergenz“ hier als Ausnahme aufgenommen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Permafrost (1.3.04.01)

Vollständige Inlandsvereisung (1.3.05.02)

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

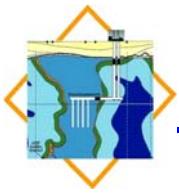
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01)



2.) Versatzkompaktion (2.1.07.04)

Die Versatzkompaktion hat insoweit Auswirkungen auf den Fluiaddruck, dass sowohl die Fluide in einem Grubenbau als auch der Versatz die einwirkenden Kräfte durch die Konvergenz aufnehmen. In Strecken ohne Versatz würden die einwirkenden Kräfte allein von den Fluiden aufgenommen. Der Versatz und der Prozess der Versatzkompaktion stellen der Konvergenz einen zusätzlichen Stützdruck entgegen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Konvergenz (2.1.07.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

3.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

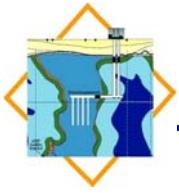
Die Änderung in den Volumina von einigen Materialien im Endlager z. B. durch Korrosion kann einen Einfluss auf die Volumina der Fluide haben. Das FEP ist daher prinzipiell zu berücksichtigen. Als auslösende FEPs für eine Volumenänderung kommen „Quellen des Bentonits“, „Metallkorrosion“ und „Matrixkorrosion“ in Frage, deren Einfluss auf den Fluiaddruck ist, wie in den jeweiligen FEPs beschrieben, vernachlässigbar. Daher ist der Einfluss der „Nicht thermisch induzierten Volumenänderung von Materialien“ auf den „Fluiaddruck“ ebenfalls zu vernachlässigen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Metallkorrosion (2.1.09.03)

Matrixkorrosion (2.1.09.04)



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Organika (2.1.01.04)

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Konvergenz (2.1.07.01)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

4.) Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

5.) Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Die Lösungsmengen im Grubenbau und deren zeitliche Veränderungen haben entscheidenden Einfluss auf den Fluiiddruck. Im Referenzszenario sind – abgesehen von den Grubenbauen in direkter Nachbarschaft zum Schachtverschluss – außer der Restfeuchte im Versatz und der Gebirgsfeuchte keine Lösungen zu betrachten. Die zu betrachtenden Lösungsmengen im Referenzszenario sind daher sehr gering und der Fluiiddruck wird hauptsächlich über den Gasdruck bestimmt.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

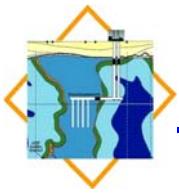
Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Diapirismus (1.2.09.01) (Revision: entfällt als beeinflussendes FEP)

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)



Radiolyse (2.1.13.03)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

Thermomigration (2.2.10.05)

6.) Durchströmen von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Das Durchströmen von Versatz und technischen Barrieren hat entscheidenden Einfluss auf die Fluiddruckverteilung im Endlager. Im Referenzszenario ist aber nicht von einer Durchströmung von Barrieren auszugehen. Lediglich in direkter Nachbarschaft zum Schachtverschluss gelangen über die langen zu betrachtenden Zeiträume geringe Lösungsmengen in das Grubengebäude.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

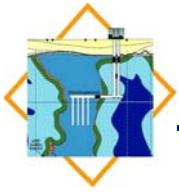
Fluiddruck (2.1.07.03)

Rissbildung (2.1.07.06) (Revision: geht in „Auflockerungszone“ (2.2.01.01) auf)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Lageverschiebung des Schachtverschlusses (2.1.07.08)

Permeabilität (2.1.08.08)



7.) Lösungszutritt in Grubenbau (2.1.08.07)

Lösungszutritte in einen Grubenbau erhöhen die Menge an Fluiden in dem betroffenen Bereich und können somit indirekt zu einem erhöhten Fluiddruck führen. Wegsamkeiten zum Deck- und Nebengebirge über durchgehende Anhydritbänder sind nicht zu berücksichtigen, eventuell können aus den isolierten Anhydritschollen jedoch kleinere Lösungsmengen ins Grubengebäude zutreten.

Stellt keine direkte Abhängigkeit dar und wird in der Version 2 des FEP-Kataloges als indirekte Abhängigkeit über das FEP „Lösungen im Grubenbau“ berücksichtigt

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Durchströmen von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Porosität (2.1.08.01)

Gaseindringdruck (2.1.12.05)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

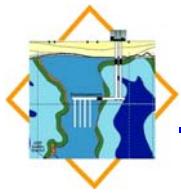
Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

8.) Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Das geochemische Milieu wirkt auf vielfältige Art und Weise auf den Fluiddruck. Der direkte Einfluss ist aber vergleichsweise von geringer Bedeutung und kann über die entsprechenden indirekten Prozesse (vor allem Gasbildung) berücksichtigt werden.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)

Inventar: Metalle (2.1.01.02)

Inventar: Organika (2.1.01.03)

Inventar: Sonstige Stoffe (2.1.01.04)

Abfallmatrix: Zusammensetzung (2.1.02.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Eigenschaften“ (2.1.02.02))

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02))

Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Metallkorrosion (2.1.09.03)

Matrixkorrosion (2.1.09.04)

Zersetzung von Organika (2.1.10.01)

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Gasbildung (2.1.12.01)

Radiolyse (2.1.13.03)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

Radionuklid-Mobilisierung (3.2.01.02)

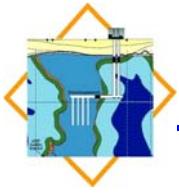
Chemische Speziation (3.2.02.01)

Sorption, Desorption (3.2.03.01)

Kolloide (3.2.04.01)

Komplexbildung (3.2.05.01)

Diffusion (3.2.07.04)



9.) Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Durch thermische Expansion und Kontraktion können sich Verformungen und Volumenänderungen ergeben, die Auswirkungen auf den Fluiaddruck haben. Die auslösenden Prozesse für eine thermische Expansion sind aufgrund des vorgegebenen Temperaturkriteriums von 200°C aber gering ausgeprägt (Wärmeproduktion) oder spielen nur im Deck- und Nebengebirge zu späten Zeitpunkten eine Rolle (Permafrost). Insgesamt ist dieser Prozess wenig relevant, da er den Fluiaddruck hinsichtlich seines Einflusses auf die einschlusswirksamen Barrieren wenig beeinflusst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

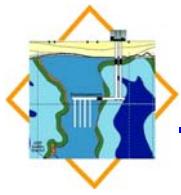
- Permafrost (1.3.04.01)
- Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)*
- Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))*
- Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))*
- Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))*
- Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))*
- Wirtsgestein (2.2.02.01)

10.) Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Da im Referenzszenario außer der Restfeuchte im Versatz und der Gebirgsfeuchte keine Lösungen zu betrachten sind und ein Temperaturmaximum von 200°C gilt (in di-



rekter Nähe der Abfallgebinde) ist der Einfluss auf den Fluiddruck gering und braucht für die Ableitung der Ausprägung im Referenzszenario nicht betrachtet zu werden.

Auslösendes FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Fluiddruck (2.1.07.03)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Wärmeleitung (2.1.11.01)

11.) Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)

Die Gasmenge beeinflusst den Fluiddruck über die Teilchenzahl. Im Referenzszenario wird der Fluiddruck in den Einlagerungsbereichen hauptsächlich durch die Gasphase bestimmt. Wichtig für die Gasmenge im Grubenbau und damit den Fluiddruck ist das FEP „Gasbildung“. Im Referenzszenario ist sie aufgrund des geringen Wasserdargebots sehr schwach ausgeprägt. Die Gasmenge im Grubenbau entspricht somit weitgehend der Menge der im Grubenbau vorhandenen Luft.

Auslösendes FEPs (2. Ebene):

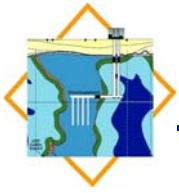
Gasbildung (2.1.12.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.1.05.03)

Imprägnierung (2.1.12.06) (Revision: geht in „Gasinfiltration ins Salzgestein“ (2.2.11.01) auf)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)



12.) Gasvolumen (2.1.12.03)

Das Gasvolumen, das in einem Grubenbau von der Gasphase unter den herrschenden Bedingungen eingenommen wird, steht in Wechselbeziehung mit dem Fluiaddruck (bei idealen Gasen umgekehrt proportional zur Gasmenge (s. o.) und der Temperatur).

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Erkundungssohle (1.1.02.02)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Konvergenz (2.1.07.01)

Fluiaddruck (2.1.07.03)

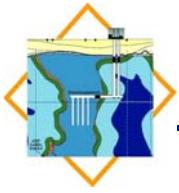
Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)

Gaseindringdruck (2.1.12.05)

Im FEP-Katalog fehlt als beeinflussendes FEP die „Wärmeproduktion“. (Eigentlich wirkt die Wärmeproduktion indirekt über die Temperatur, die aber im FEP-Katalog nicht als einzelnes FEP aufgeführt wird.)

13.) Imprägnierung (2.1.12.06)

Bei Gasdrücken im Niveau, die in der Größenordnung des lithostatischen Druckes liegen, kann das in einem Hohlraum vorhandene Gas unter Bildung von fein verteilten Wegsamkeiten in das Wirtsgestein Salz eindringen. Ein gegebenenfalls erhöhter Fluiddruck kann sich über diese Permeabilität abbauen. Nach Abbau des Fluiaddrucks verschließt sich das Wirtsgestein wieder (POPP, T., WIEDEMANN, M. et al. 2007). (Auch bei Drücken über dem lithostatischen Druck, die aber im Referenzszenario aufgrund der geringen Gasbildung nicht erwartet werden, würde dieser Prozess zu einem gewünschten Druckabbau führen.)



Das FEP wird in der gegenwärtigen Form in der Version 2 des FEP-Kataloges entfernt. Teilweise werden die Inhalte in das neue FEP „Gasinfiltration ins Salzgestein“ aufgenommen. Dort werden vor allem die Ergebnisse des Forschungsvorhabens SR 2470 berücksichtigt, das einen Gasfrac des Salzgesteins aufgrund einer sich reversibel bildenden Sekundärpermeabilität ausschließt (POPP, T., WIEDEMANN, M. et al. 2007). Eine Bewertung dieses neuen FEPs hinsichtlich seiner auslösenden und beeinflussenden FEPs und der Wirksamkeit auf die einschlusswirksamen Barrieren steht noch aus.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

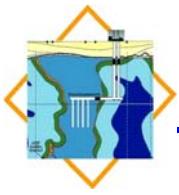
4.8.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Fluiddruck (2.1.07.03)

Für das Referenzszenario werden im nahezu gesamten Endlager keine größeren Lösungsvorkommen unterstellt. Ausnahmen sind die Bereiche des Grubengebäudes nahe am Schachtverschluss, die im Laufe des Nachweiszeitraumes langsam mit Lösung erfüllt werden. Ein Vordringen zu den Einlagerungsbereichen ist bei intakten Verschlussbauwerken nicht zu erwarten.

Der Fluiddruck wird vorrangig vom Gasdruck und dem Gasvolumen im Grubengebäude bestimmt. 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 mit der Zeit verringert.

Wichtig für das Referenzszenario sind demnach die Konvergenz und die Gasmenge im Grubenbau sowie ihre auslösenden Prozesse: die Spannungsänderung und Spannungsumlagerung bzw. die Gasbildung. Da die auslösenden Prozesse der Gasbildung



(Metallkorrosion, Zersetzung von Organika, Verdampfen von Wasser und Radiolyse) von der vorhandenen sehr geringen Lösungsmenge im Grubengebäude abhängen, ist die Ausprägung der Gasbildung aber vergleichsweise gering. Die Konvergenz führt letztendlich zu einer Erhöhung des Fluiaddrucks, ein über den Gebirgsdruck hinausgehender Fluiaddruck ist aber nicht zu erwarten. (Selbst bei darüber hinausgehenden Drücken wäre aber aufgrund der entstehenden Sekundärpermeabilität im Wirtsgestein die Druckzunahme im Porenraum begrenzt).

Da die Fluiaddrücke nicht signifikant über den lithostatischen Druck hinausgehen können, braucht ein Gasfracereignis im Wirtsgestein im Referenzszenario nicht betrachtet zu werden. Die Verschlussbauwerke sind so ausgelegt, dass ihre erwartete Funktionalität von Fluiaddrücken, die den Gebirgsdruck nicht übersteigen, nicht beeinträchtigt wird.



4.8. FEP Fluiddruck (2.1.07.03)

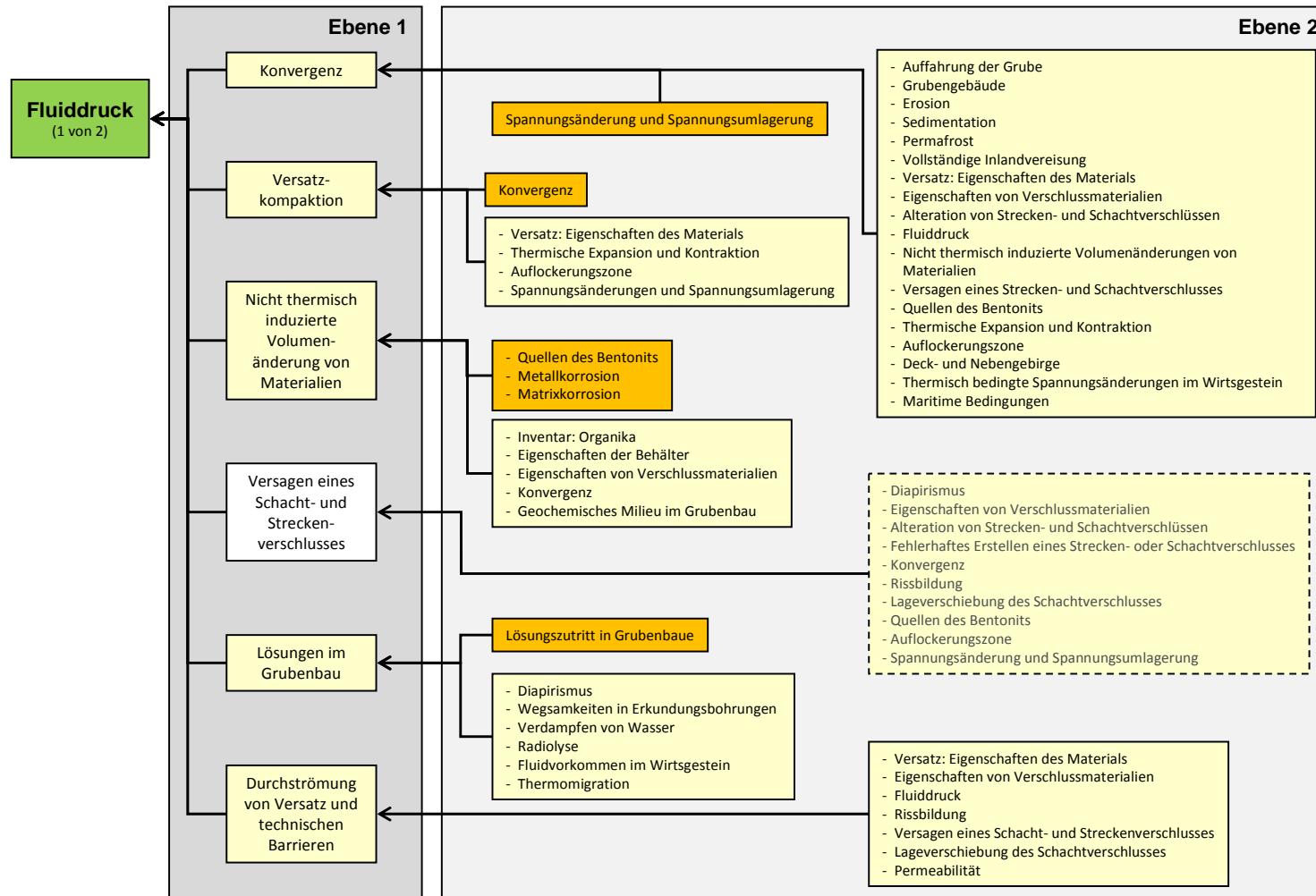
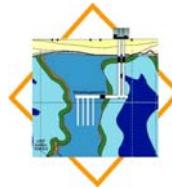


Abb. 10: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Fluiddruck (Teil 1) bis in die 2. Ebene.



4.8. FEP Fluiddruck (2.1.07.03)

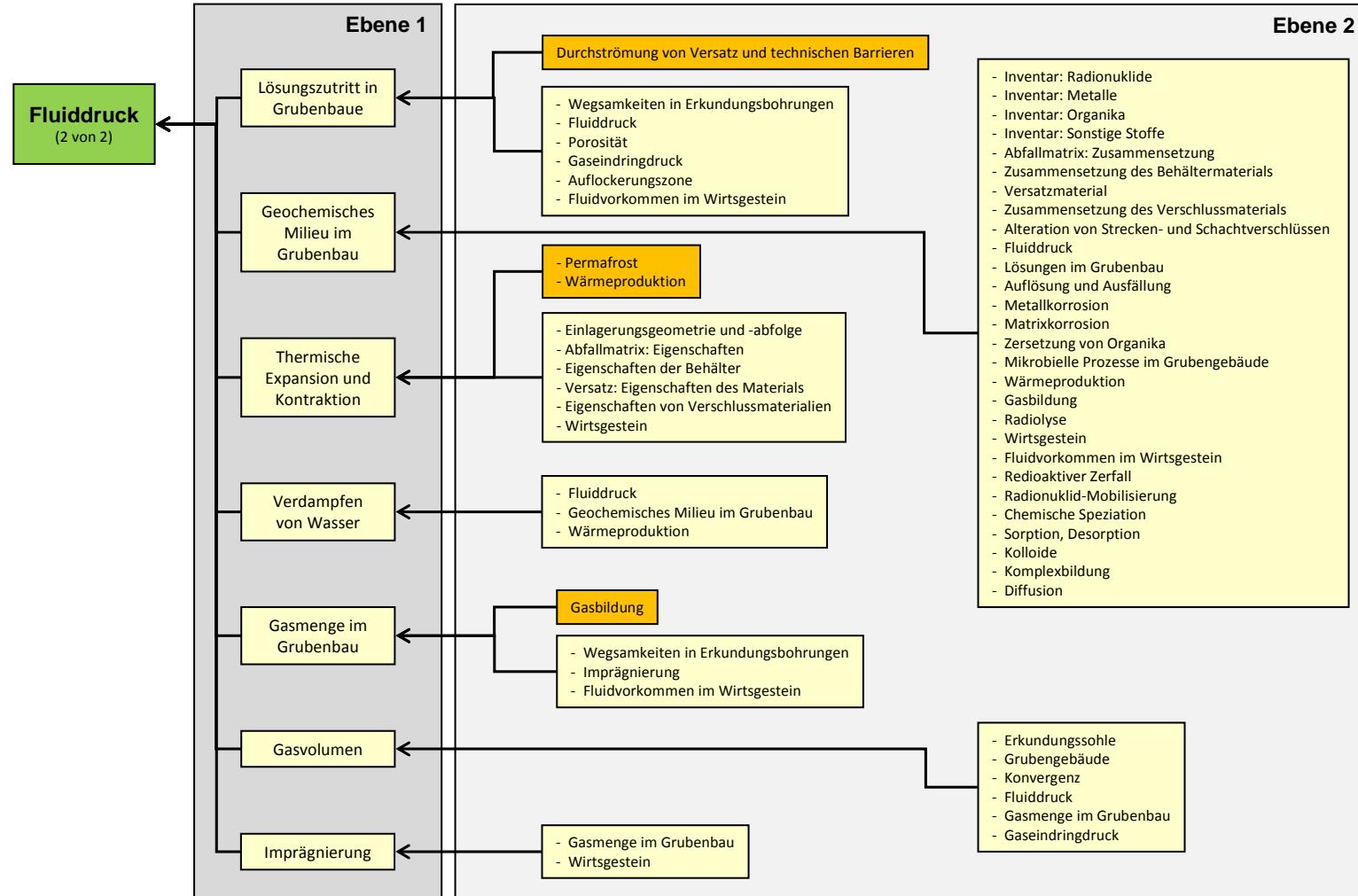
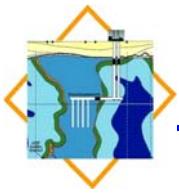


Abb. 11: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Fluiddruck (Teil 2) bis in die 2. Ebene.



4.9. FEP Rissbildung (2.1.07.06)

Das FEP beinhaltet das Aufreißen von Feststoffbereichen infolge mechanischer Belastung. Da dadurch Wege für Flüssigkeiten und Gase geschaffen werden können, ist das FEP relevant in Bereichen, die eineabdichtende Funktion haben. Es muss deshalb betrachtet werden für Verschlüsse in Strecken und Schächten sowie für das Wirtsgestein, wobei eine Sicherheitsrelevanz im Wirtsgestein nicht generell gegeben ist, sondern nur in denjenigen Bereichen vorliegt, in denen das Wirtsgestein eine Barrierefunktion trägt.

Die FEPs Rissbildung und Auflockerungszone werden in der Version 2 des FEP-Kataloges zusammengefasst.

4.9.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

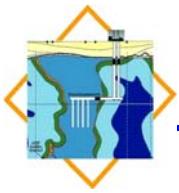
Rissbildung findet statt, wenn an einem betrachteten Ort der Spannungszustand die Festigkeit des dort vorhandenen Materials übersteigt. Gegebenheiten, Prozesse oder Ereignisse, die auf andere Weise als durch Spannungen, die oberhalb der Festigkeit liegen, Risse erzeugen, existieren mit Ausnahme der Lageverschiebung des Schachtverschlusses nicht.

Keine identifiziert.

4.9.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Permafrost (1.3.04.01)

Eine Änderung der klimatischen Verhältnisse mit Absenkung der mittleren Jahrestemperaturen hat auch eine Abkühlung des Gebirges bis in begrenzte Tiefe zur Folge. In größeren Tiefen ist der Einfluss des aus der Tiefe nachgelieferten Wärmestroms, der sich im geothermischen Tiefengradienten abzeichnet, dominant. Eine Abkühlung des Gebirges ist aufgrund der damit verbundenen thermischen Kontraktion der abgekühlten Gebirgsbereiche mit einer Änderung der Spannungsverhältnisse verbunden. In der Li-



teratur wird eine Rissbildung im Salzgestein durch solche thermisch induzierten Spannungen in der Folge von Klimaänderungen in Teufen bis zu 600 m diskutiert. Die Beobachtungen wurden an nahe der Oberfläche liegenden Salzstöcken gemacht. Vom gut untersuchten Referenzstandort mit einem Salzspiegel um 300 m Tiefe liegen bislang keine vergleichbaren Beobachtungen vor.

Für die Spannungsverhältnisse am Salzspiegel wird herrschender Permafrost daher als beeinflussend im Rahmen von Alternativszenarien unterstellt. Das Ausmaß der Beeinflussung muss in thermomechanischen Rechnungen ermittelt werden.

Für die Abdichtungen in den Schächten kann die Beeinflussung durch Permafrost unberücksichtigt bleiben, da in den Szenarien schon vor dessen Einsetzen der Verlust der Dichtwirkung der Abdichtungen angesetzt wird. Die vollständige Kompaktion des Salzgrusversatzes und einer daraus resultierenden Dichtwirkung wird vor dem Einsetzen des Permafrosts als gegeben unterstellt.

Unbedeutend für die Ausprägung des FEP „Rissbildung“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Menschlicher Einfluss auf das Klima (1.4.01.01)

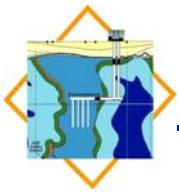
Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)

2.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

Eine Rissbildung in Verschlüssen aus anderen Gründen als thermischer Einwirkung wird durch die Auswahl der Verschlussmaterialien und die Auslegung der Bauwerke verhindert. Die Ausprägung des FEP „Rissbildung“ ist folglich insofern von den Verschlussmaterialien abhängig, als durch ihre geeignete Auswahl eine Rissbildung vorbeugt wird. Darüber hinaus brauchen, abgesehen von ihren thermischen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Wirkung von Permafrost, die Eigenschaften von Verschlussmaterialien nicht für die Ausprägung des FEP „Rissbildung“ berücksichtigt werden.



Das FEP wird nach der Revision in der Version 2 des FEP-Kataloges mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01) zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)
- Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)
- Konvergenz (2.1.07.01)
- Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)
- Quellen des Bentonits (2.1.08.08)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

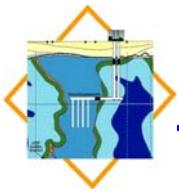
3.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Wenn sich im Verlauf der Zeit die Eigenschaften der Strecken- und Schachtverschlüsse z. B. durch Veränderungen des geochemischen Milieus ändern, kann der Widerstand der Abdichtungen gegen Rissbildungen beeinträchtigt werden. Dem wird begegnet, indem für den gesamten Zeitraum der geplanten Nutzungsdauer der Strecken- und Schachtverschlüsse durch geeignete Materialwahl und Auslegung die Beibehaltung der Riss verhindernden Eigenschaften sichergestellt wird.

Für die Ausprägung des FEP „Rissbildung“ spielt die „Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen“ daher keine Rolle.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))*
- Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)
- Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)
- Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

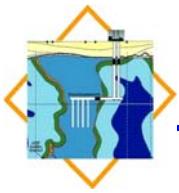
4.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

5.) Konvergenz (2.1.07.01)

Durch die Konvergenz der Strecken, Bohrungen und weiteren Grubenbaue wird der insgesamt vorhandene Hohlraum im Lauf der Zeit reduziert und ein zunehmender Stützdruck auf die Hohlraumkontur wirksam, so dass die effektiven Spannungen im Gebirge abnehmen. Das wirkt der Ausbildung von Auflockerungszonen entgegen und kann besonders bei Anwesenheit von Feuchtigkeit zur Verheilung bestehender Auflockerungszonen führen. Da im FEP „Rissbildung“ nur die Effekte außerhalb dieser Zone um bergmännische Hohlräume berücksichtigt werden, ist diese Auflockerungszonen reduzierende Wirkung der Konvergenz für das FEP „Rissbildung“ irrelevant. Eine Auswirkung der Konvergenz auf durch klimatisch bedingt potenziell rissgefährdete Bereiche am Salzspiegel kann nur indirekt über das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ erfolgen.

Rissbildungen in Verschlussbauwerken infolge Konvergenz des Gebirges sind nicht zu erwarten, da bei der Auslegung der Bauwerke solche Belastungen berücksichtigt werden.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Permafrost (2.1.08.02)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

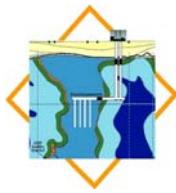
Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

6.) Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Volumenänderungen durch Metallkorrosion oder Austrocknung bzw. Durchfeuchtung von quellfähigen Materialien können Spannungsänderungen im umgebenden Gebirge bewirken. Da solche Volumenänderungen langsam ablaufen, werden sie im kriechfähigen Salzgebirge durch bruchlose Kriechverformungen kompensiert und haben im Referenzszenario keinen Einfluss auf das FEP Rissbildung.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Quellen des Bentonits (2.2.10.03)
- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Matrixkorrosion (2.1.09.04)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Inventar: Organika (2.1.01.03)
- Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))*
- Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))*
- Konvergenz (2.1.07.01)
- Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

7.) Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

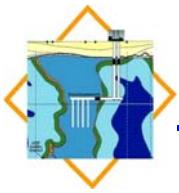
Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

8.) Lageverschiebung des Schachtverschlusses (2.1.07.08)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

9.) Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Die durch Temperaturänderungen bewirkte Volumenänderung betrifft alle Bestandteile des Endlagers, die von Temperaturänderungen infolge der Wärmeproduktion der eingelagerten Abfälle oder aus klimatischen Veränderungen erfasst werden. Die dadurch



im Wirtsgestein verursachte Veränderung des Spannungszustands wird über das FEP „Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein“ behandelt. Verschlussbauwerke werden so ausgelegt, dass thermisch induzierte Spannungen dort nicht zu Rissbildungen führen. Thermische Expansion und Kontraktion ist daher bezüglich Rissbildungen in Verschlussbauwerken nicht Bestandteil des Referenzszenarios.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Wärmeleitung (2.1.11.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

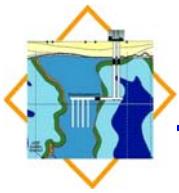
Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Wirtsgestein (2.2.02.01)

10.) Auflockerungszone (2.2.01.01)

Direkte Einwirkungen des FEP auf die Funktion der ewB Strecken- und Schachtverschlüsse.

Das FEP wird in der Version 2 des FEP-Kataloges mit „Rissbildung“ (2.1.07.06) zusammengefasst.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

*Rissbildung (2.1.07.06) (Revision: geht in „Auflockerungszone“ (2.2.01.01) auf)
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)*

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

*Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))
Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)
Konvergenz (2.1.07.01)
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
Wirtsgestein (2.2.02.01)
Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)*

11.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Da Rissbildung stattfindet, wenn die herrschenden Spannungen die Festigkeit des Materials übersteigt, ist das FEP „Rissbildung“ mit allen FEPs, die Einfluss auf den Spannungszustand haben, verknüpft. Zur Ermittlung des Spannungszustandes und seiner zeitlichen Veränderung im Referenzszenario müssen Spannungsumlagerungen vollständig berücksichtigt werden.

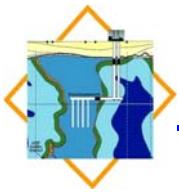
Bedeutend für die Ausprägung des FEP „Rissbildung“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)
Fluiddruck (2.1.07.03)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

*Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)
Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)*



Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Versatzkompaktion (2.1.07.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

12.) Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Materialien ändern bei Temperaturänderungen ihr Volumen oder, wenn dies durch eine Einspannung nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, die auf die Einspannung übertragene Spannung und damit den Spannungszustand im Material selbst. Wenn dadurch die Festigkeit des Materials überschritten wird, kann es zur Rissbildung kommen. Im Referenzszenario muss auf die Notwendigkeit von thermomechanischen Berechnungen zum Wirtsgestein hingewiesen werden.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

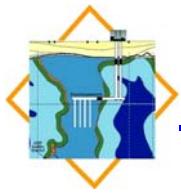
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Permafrost (1.3.04.01)

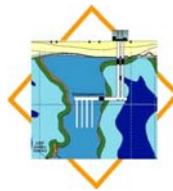
Wirtsgestein (2.2.02.01)



4.9.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Rissbildung (2.1.07.06)

Rissbildungen sind relevant in Bereichen, die eine abdichtende Funktion haben. Das FEP „Rissbildung“ muss deshalb für Verschlüsse in Strecken und Schächten sowie für das Wirtsgestein betrachtet werden. Für das Referenzszenario muss in thermomechanischen Berechnungen ermittelt werden, wo in Verschlussbauwerken oder im Wirtsgestein Spannungszustände oberhalb der Festigkeit auftreten und ein Integritätsverlust auftritt. Dabei sind die Veränderungen der Spannungen aufgrund von Hohlraumauffahrungen, Kriechvorgängen, Fluiddrücken, geänderten Gebirgsauflasten (z. B. Inlandvereisung, Meeresüberflutung) sowie in der Folge von Temperaturänderungen im Referenzszenario zu berücksichtigen. Als Ursache für eine Aufheizung des Wirtsgesteins ist die Wärmeproduktion der Abfälle anzusehen. Bei Abklingen der Aufheizung kommt es zur Gesteinskontraktion, die zu Rissbildungen führen kann. Außerdem können Kaltzeiten zur Abkühlung des oberflächennahen Salzgebirges und zu Rissbildungen durch Kontraktion am Salzspiegel führen.



4.9. FEP Rissbildung (2.1.07.06)

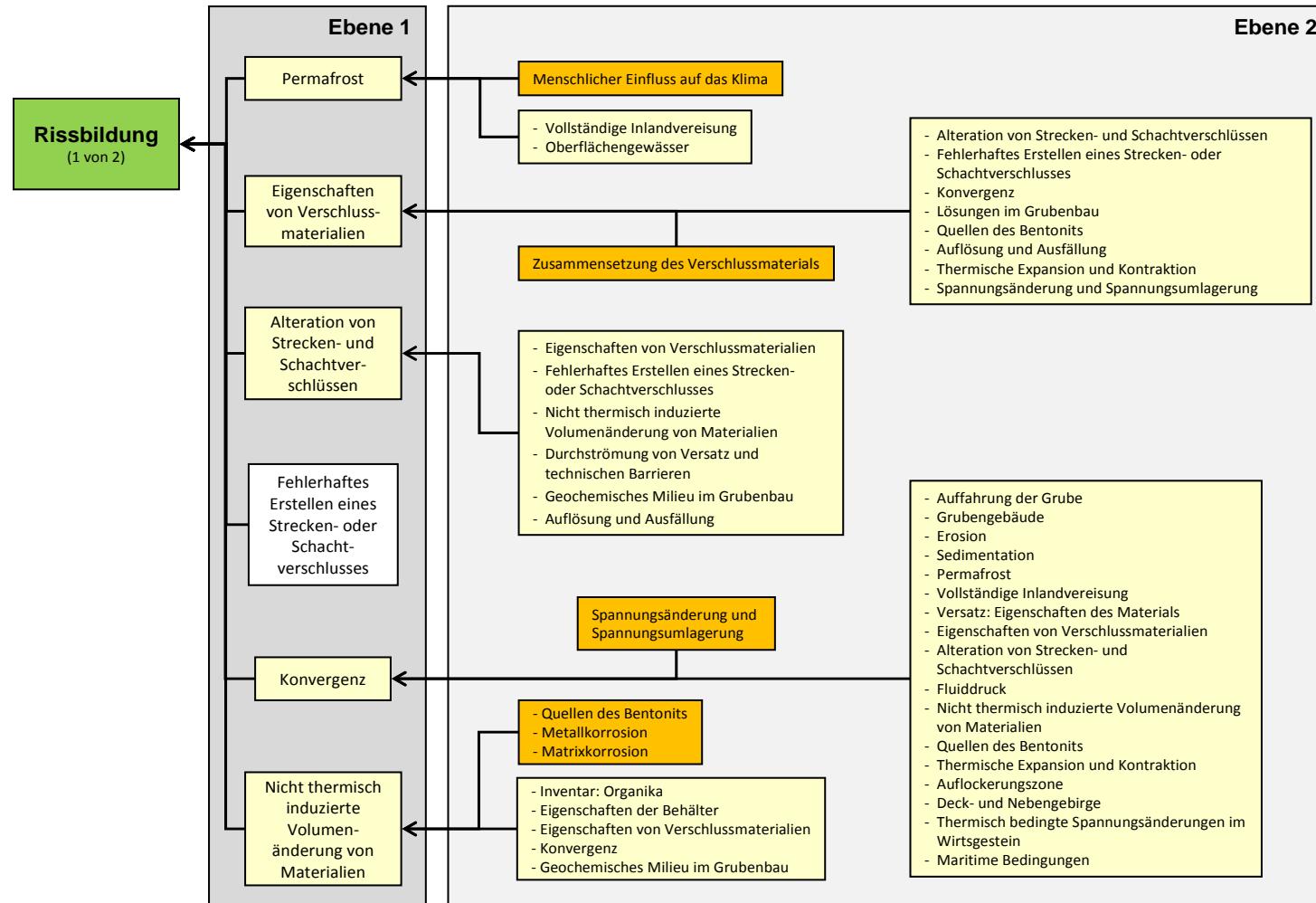
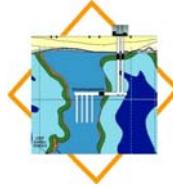


Abb. 12: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Rissbildung (Teil 1) bis in die 2. Ebene.



4.9. FEP Rissbildung (2.1.07.06)

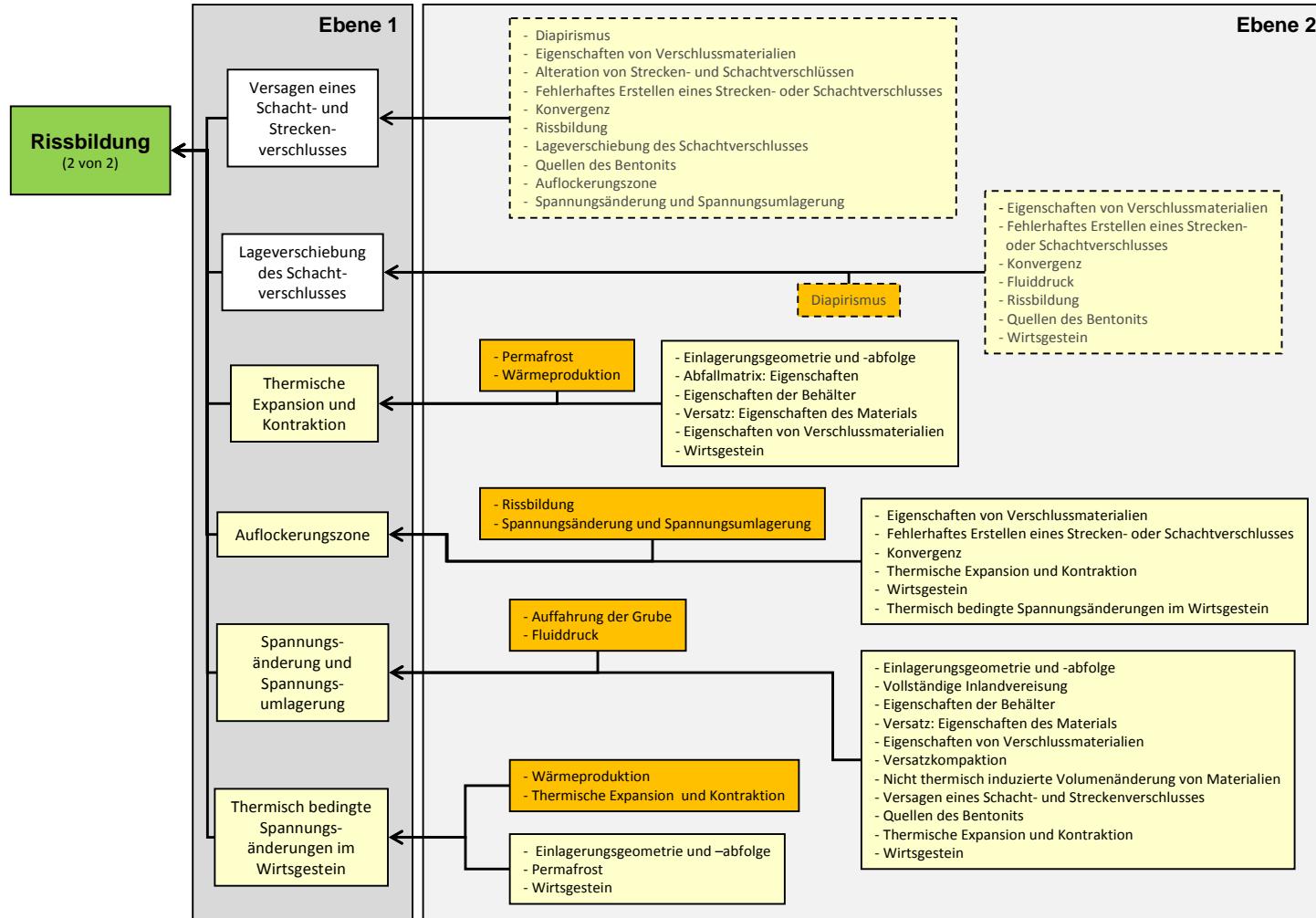
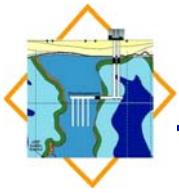


Abb. 13: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Rissbildung (Teil 2) bis in die 2. Ebene.



4.10. FEP Absinken der Abfallbehälter (2.1.07.09)

Die Abfallgebinde werden aufgrund ihrer höheren spezifischen Wichte im fließfähigen Steinsalz absinken.

Da es sich um eine Form des „feststoffgebundenen Radionuklidtransports“ handelt, werden diese FEPs in der Version 2 des FEP-Kataloges zusammengefasst, wobei das FEP „Absinken der Abfallbehälter“ entfällt.

4.10.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

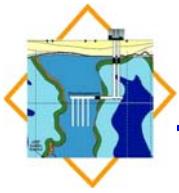
Ein Absinken der Abfallbehälter ist die zwangsläufige Folge, wenn das Salz kriechfähig ist, eine Kriechgrenze nicht existiert und das spezifische Gewicht der eingelagerten Abfallgebinde größer ist als das des umgebenden Salzes. Gegebenheiten, Prozesse oder Ereignisse, die auf andere Weise als durch den Vorgang des viskoplastischen Fließens ein Absinken der Abfallbehälter bewirken können, existieren nicht. Daher gibt es für das FEP „Absinken der Abfallbehälter“ keine auslösenden FEP.

Keine identifiziert.

4.10.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01)

Die Abfolge der Einlagerung legt den Zeitpunkt fest, an dem ein bestimmtes Gebinde eingelagert ist und der Vorgang des Absinkens dieses Gebindes beginnen kann. Der insgesamt für das Absinken zur Verfügung stehende Zeitraum ist der gesamte Nachweiszeitraum. Demgegenüber ist die um mehrere Größenordnungen kleinere Länge der Betriebsphase, innerhalb derer der Zeitpunkt für den Beginn des Absinkens variieren kann, vernachlässigbar klein. Eine Berücksichtigung des exakten Zeitpunkts für den Beginn eines potenziellen Absinkvorgangs kann daher im Referenzszenario unterbleiben.



Entfällt in der Version 2 des FEP-Kataloges.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

2.) Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02)

Neben der temperaturabhängigen Kriechfähigkeit des Salzes sind für das Absinken der Abfallbehälter deren Form und spezifisches Gewicht bedeutend. Insbesondere die Unterscheidung zwischen dünnwandigen Bohrlochkokillen und dickwandigen Behältern für die Streckenlagerung muss auch im Referenzszenario vorgenommen werden.

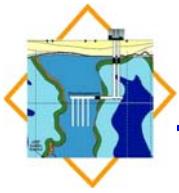
Das FEP wird nach der Revision in Version 2 des Kataloges mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01) zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Zersetzung von Organika (2.1.10.01)
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Materialversprödung durch Strahlung (2.1.13.02)
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)



3.) Konvergenz (2.1.07.01)

Die Betrachtung des Mediums Salz als hochviskose Flüssigkeit bei der Beschreibung des Absinkens von Abfallgebinden setzt voraus, dass die Gebinde vom Salz vollständig und unmittelbar umgeben sind. Solange die in vertikalen Bohrlöchern eingelagerten Bohrlochkokillen von nicht-kompaktiertem, rolligem Salzgrus umgeben sind, wird die Interaktion zwischen Behälter und Salz durch die mechanischen Eigenschaften des Salzgruses beeinflusst. Für das Referenzszenario und für Alternativszenarien erscheint eine Berücksichtigung dieses Umstandes verzichtbar, da der Salzgrus im Ringraum zwischen Wärme entwickelnden Bohrlochkokillen und Bohrlochwand infolge der thermischen Ausdehnung des umgebenden Gebirges innerhalb einer im Vergleich zum Nachweiszeitraum sehr kurzen Zeit vollständig kompaktieren wird. Der kompaktierte Salzgrus besitzt die gleichen Eigenschaften wie das umgebende Salz und damit sind die Voraussetzungen für die Betrachtung des Mediums Salz als hochviskose Flüssigkeit gegeben.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Permafrost (1.3.03.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

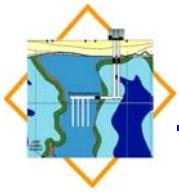
Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)



Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01)

4.) Wirtsgestein (2.2.02.01)

Für das Absinken der Abfallgebinde ist die Kriechfähigkeit des Wirtsgesteins, die Bestandteil des FEPs „Wirtsgestein“ ist, von entscheidender Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Diapirismus (1.2.09.01)

Subrosion (1.2.09.02)

Permafrost (1.3.04.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

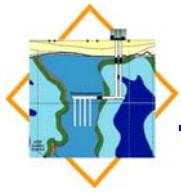
Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Radiolyse (2.1.13.03)

5.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Für die Beschreibung des Absinkens von Abfallgebinde im Salz über den Vorgang des viskoplastischen Fließens sind keine Kenntnisse zum Spannungszustand im Salz erforderlich, so dass dieses FEP für das FEP „Absinken der Abfallbehälter“ nicht berücksichtigt werden muss.



4.10.

FEP Absinken der Abfallbehälter (2.1.07.09)

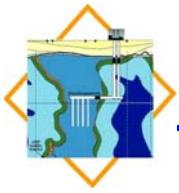
GRS BGR DBE TEC

Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Auffahrung der Grube (1.1.02.01)
- Fluiddruck (2.1.07.03)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)*
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))*
- Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))*
- Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))*
- Versatzkompaktion (2.1.07.04)
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)
- Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)
- Quellen des Bentonits (21.08.08.)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Wirtsgestein (2.2.02.01)



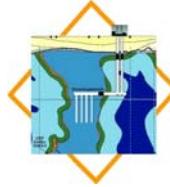
4.10.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Absinken der Abfallbehälter (2.1.07.09)

Das Absinken der Abfallbehälter ist eine Form des „Feststoffgebundenen Radionuklidtransports“ und wird durch die höhere spezifische Wichte der eingelagerten Abfallgebinde im Vergleich zum fließfähigen Steinsalz ausgelöst.

Ein Absinken der Abfallbehälter kann sicherheitsrelevant sein, wenn ein Gebinde dadurch aus dem Einlagerungsbereich heraus in Wirtsgesteinsbereiche mit ungünstigeren Barriereeigenschaften verlagert werden kann oder dadurch sicherheitsrelevante Abstände zu potenziell lösungsführenden Bereichen verringert werden können oder der räumliche und zeitliche Temperaturverlauf im Endlager verändert wird.

Für das Referenzszenario wird angenommen, dass eine Sicherheitsrelevanz durch Absinken der Abfallbehälter nicht gegeben ist. Dies muss durch Rechnungen im Rahmen von „what if“- oder Alternativszenarien untersucht werden.



4.10. FEP Absinken der Abfallbehälter (2.1.07.09)

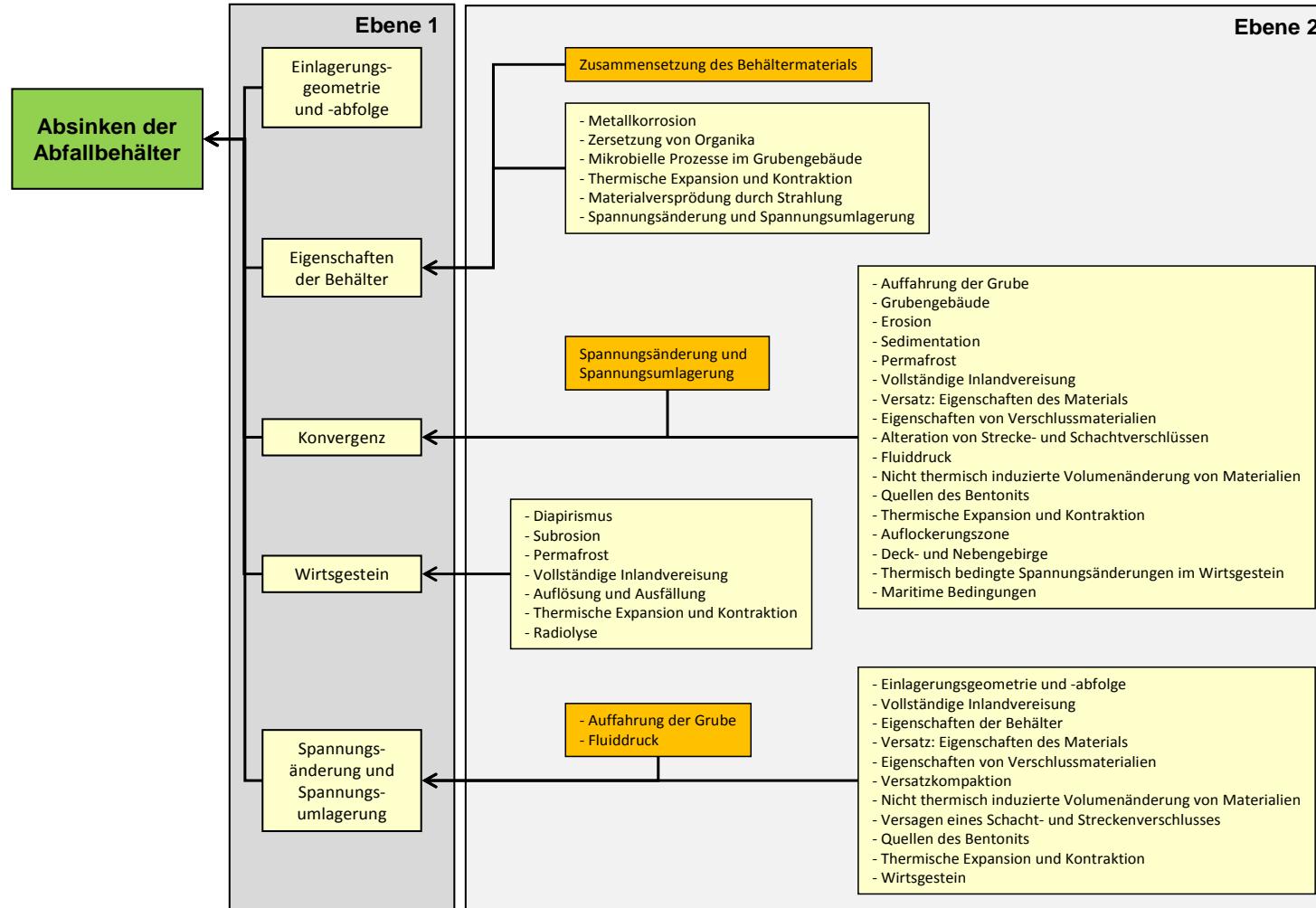
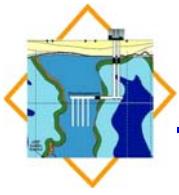


Abb. 14: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Absinken der Abfallbehälter bis in die 2. Ebene.



4.11. FEP Quellen des Bentonits (2.1.08.08.)

Bentonit ist als Baumaterial für die Dichtelemente der Schachtverschlüsse vorgesehen. Bei Wasseraufnahme quillt Bentonit und übt im eingespannten Zustand einen Druck auf die Hohlraumkontur und auf angrenzende Bauwerksteile aus. Dieser Prozess wird auf jeden Fall stattfinden und ist auch beabsichtigt, da er für die Funktionalität des Dichtelementes wichtig ist. Das FEP wirkt direkt auf die Funktion der ewB Strecken- und Schachtverschlüsse als auch Wirtsgestein ein. Berücksichtigt wird es in den Teilsystemen Strecken und Schächte sowie Wirtsgestein.

4.11.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Durchströmen von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Die in den Schächten oder den anderen Grubenräumen vorhandenen Fluide können in Abhängigkeit von herrschenden Potentialunterschieden die Resthohlräume im Versatz, in den Porenräumen der technischen Bauwerke, in den Auflockerungszonen und im Porenraum der Abfallgebinde durchströmen. Das FEP wirkt sich indirekt auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren aus.

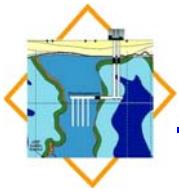
Im Referenzszenario ist während der Standzeit der Barrieren nur von geringen Lösungsmengen im Grubengebäude auszugehen. Ein hydraulischer Gradient ist lediglich an den Schachtverschlüssen zu betrachten, wobei die durchströmenden Flüssigkeitsmengen sehr gering sind und die Einlagerungsfelder nicht erreichen. Bei einem Zutritt von Grundwasser aus dem Deckgebirge zu den Schachtverschlüssen werden diese Lösungen, nachdem sie die Betonwiderlager durchdrungen haben, den Bentonit des Dichtelementes aufsättigen und so das „Quellen des Bentonits“ auslösen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))



Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Fluiddruck (2.1.07.03)

Rissbildung (2.1.07.06) (Revision: entfällt)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Lageverschiebung des Schachtverschlusses (2.1.07.08)

Permeabilität (2.1.08.02)

4.11.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Permafrost (1.3.04.01)

Das FEP beschreibt den Abschnitt einer Kaltzeit, in dem ein dauerhaft gefrorener Boden (Permafrostboden) vorherrscht. Es wird davon ausgegangen, dass dieser während einer zukünftigen Kaltzeit eine Mächtigkeit von 150 - 200 m erreichen kann. Die Abkühlung des Gebirges kann sich bis in den Bereich der Schachtverschlüsse auswirken und zu Spannungen in den Baumaterialien der Schachtverschlüsse (einschl. Bentonit) führen.

Da die Ausbildung eines Permafrostbodens frühestens in 50.000 Jahren erwartet wird, wird die Beeinflussung erst nach Ablauf der geforderten Standzeit für die Schachtverschlüsse einsetzen. Mögliche Beeinträchtigungen der Funktion der Barrieren sind daher nicht mehr sicherheitsrelevant.

Das FEP hat direkte Einwirkungen auf die Funktion der Schachtverschlüsse und des Wirtsgesteins.

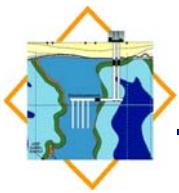
Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Änderungen (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)



2.) Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01)

Dieses FEP ist eine Randbedingung und beschreibt den stofflichen Bestand der Baumaterialien für die Verschlussbauwerke.

Das „Quellen des Bentonits“ hängt wesentlich von der mineralogischen Zusammensetzung des verwendeten Bentonit-Typs ab. Dessen Auswahl richtet sich nach dem erwarteten Chemismus des später zutretenden Grundwassers. Wichtig für das Quellvermögen ist außerdem die Einbaudichte und der Wassersättigungsgrad der Bentonitformsteine. Durch eine Zumischung von Quarz oder Gesteinsbruch zum Bentonit kann der maximale Quelldruck exakt eingestellt werden.

Das FEP ist wichtig für das FEP „Quellen des Bentonits“.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ und „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

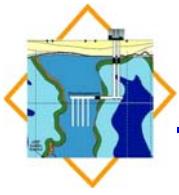
Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

3.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

Das FEP ist eine Randbedingung und beschreibt die chemo-physikalischen Eigenschaften der Baustoffe für die Verschlussbauwerke. Die Baustoffeigenschaften haben direkte Einwirkungen auf die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Zu den wichtigen Eigenschaften des Bentonits gehören die geringe Permeabilität, das Sorptionsvermögen für Radionuklide und die Langzeitstabilität unter den erwarteten zukünftigen Standortbedingungen sowie das Quellen des Bentonits zur Anbindung des Dichtelementes an die Schachtwandung und zum Stützen der Schachtwand.



Das FEP ist wichtig für das FEP „Quellen des Bentonits“.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ und „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- und Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

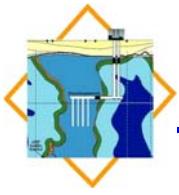
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

4.) Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Das FEP beschreibt die Anpassung der Baustoffkomponenten an veränderte geochemische Umgebungsbedingungen über die Zeit. Das FEP hat direkte Einwirkungen auf die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Die Verschlussbauwerke in den Schächten werden in direktem Kontakt mit zutretenden Grundwässern aus dem Deckgebirge stehen. Dies ist eine Voraussetzung dafür, dass sich die Bentonitdichtelemente aufsättigen und somit ihre Funktionsanforderungen erfüllen können. Sollte sich langfristig, z. B. durch Klimaänderungen, der Chemismus der Grundwässer ändern, so kann das Quellvermögen und die Langzeitstabilität des Bentonits und somit die Funktion des Dichtelementes beeinträchtigt werden.



Das FEP beschreibt wichtige Entwicklungsmöglichkeiten für das FEP „Quellen des Bentonits“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02).

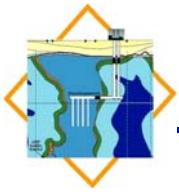
5.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

6.) Konvergenz (2.1.07.01)

Aufgrund von Spannungsumlagerungen im Gebirge, die durch die Auffahrung der Grubenhäume hervorgerufen werden, kriecht das elasto-plastische Salz in die Hohlräume. Dieser immer ablaufende Prozess hat direkte Einwirkungen auf die Schacht- und Streckenverschlüsse sowie das Wirtsgestein.

In den Schächten führt die Konvergenz zu einer Einspannung der Barrieren. Das Bentonit-Quellen wirkt der Konvergenz entgegen und es bildet sich ein Stützdruck aus. Sobald der Stützdruck den lithostatischen Druck erreicht hat, werden die Konvergenz und das Bentonit-Quellen zum Erliegen kommen.



Das FEP ist für das FEP „Quellen des Bentonits“ wichtig.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs:

Auffahrung der Grube (1.1.02.01) (Revision: entfällt)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Permafrost (1.3.04.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

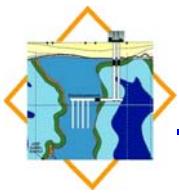
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01) (Revision: entfällt)

7.) Fluiddruck (2.1.07.03)

Der Fluiddruck ist eine Randbedingung und beschreibt den Druck von Lösungen und/oder Gasen in einem Grubenbau. Er wirkt sich direkt auf die Funktion von Strecken- und Schachtverschlüssen sowie das Wirtsgestein aus.

Während der Fluiddruck durch Lösungen maximal dem lithostatischen Druck entsprechen kann, kann bei Gasbildung, z. B. durch Korrosion der Abfallbehälter, ein Druck



entstehen, der über den lithostatischen Druck hinausgeht. Für die Schachtverschlüsse stellt der Fließdruck einen Lastfall dar, gegen den die Barrieren ausgelegt werden.

Da die Einwirkung des Fließdrucks durch die Auslegung abgedeckt wird, ist das FEP für das FEP „Quellen des Bentonits“ von geringer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Konvergenz (2.1.07.01) (zusätzlich aufgenommen s. a. Kapitel 4.8.2)

Versatzkompaktion (2.1.07.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)

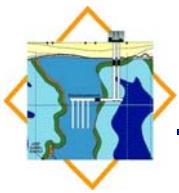
Gasvolumen (2.1.12.03)

Imprägnierung (2.1.12.06) (Revision: geht in „Gasfiltration ins Salzgestein“ (2.2.11.01) auf)

8.) Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Das geochemische Milieu charakterisiert die wässrige Lösung in einem Grubenbau und stellt eine Randbedingung dar. Das FEP wirkt über eine Vielzahl chemischer Prozesse indirekt auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren ein.

Im Bereich der Schächte werden sich ober- und unterhalb der Schachtverschlüsse unterschiedliche geochemische Milieus ausbilden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich



der Chemismus der Lösungen beim Durchströmen verschiedener Barriereelemente ändert. Dies gilt besonders für die Betonwiderlager der Schachtverschlüsse, während die Bentonit-Dichtelemente als Ionenfilter wirken. Im oberen Schachtabschnitt wird das geochemische Milieu durch Grundwässer bestimmt, die aus dem Deckgebirge zulaufen werden. Das geochemische Milieu im unteren Teil hängt einerseits von den geringen Mengen durchströmender Deckgebirgslösungen und andererseits davon ab, ob es begrenzte Lösungszutritte aus dem Wirtsgestein zum Grubengebäude geben wird. Die verschiedenen Elemente der Schachtverschlüsse werden im Hinblick auf die Baumaterialien entsprechend des erwarteten geochemischen Milieus ausgelegt. Die Funktion der Bentonitbarriere hängt von der Salinität der zutretenden Lösungen ab. Höher salinare Lösungen reduzieren das Quellvermögen und die Sorptionskapazität.

Da das chemische Milieu durch die Auslegung der Schachtverschlüsse abgedeckt wird, ist das FEP für das FEP „Quellen des Bentonits“ von geringer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)

Inventar: Metalle (2.1.01.02)

Inventar: Organika (2.1.01.03)

Inventar: Sonstige Stoffe (2.1.01.04)

Abfallmatrix: Zusammensetzung (2.1.02.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Eigenschaften“(2.1.02.02))

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“(2.1.03.02))

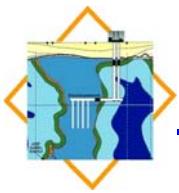
Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)



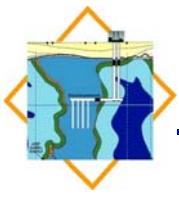
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Matrixkorrosion (2.1.09.04)
- Zersetzung von Organika (2.1.10.01)
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)
- Wärmeproduktion (2.1.11.01)
- Gasbildung (2.1.12.01)
- Radiolyse (2.1.13.03)
- Wirtsgestein (2.2.02.01)
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)
- Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)
- Radionuklid-Mobilisierung (3.2.01.02)
- Chemische Speziation (3.2.02.01) (Revision: entfällt)*
- Sorption, Desorption (3.2.03.01)
- Kolloide (3.2.04.01)
- Komplexbildung (3.2.05.01)
- Diffusion (3.2.07.04)

9.) Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Aus der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle resultiert eine Aufheizung des Wirtsgesteins, die durch Spannungsänderungen im Gebirge indirekt auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren einwirkt.

Nach einigen Tausend Jahren erreicht die Wärmefront durch den radioaktiven Zerfall der Abfälle den Salzspiegel und den Schachtbereich (FEP 2.2.10.04 „Temperaturänderungen am Salzspiegel“). Der Temperaturanstieg bewirkt durch thermische Expansion des Gesteins Spannungsänderungen in den Schachtverschlüssen. Diese Änderungen werden als Lastfall bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt.

Da die Wärmeproduktion und die daraus resultierenden Spannungsänderungen im Wirtsgestein durch die Auslegung der Schachtverschlüsse abgedeckt werden, ist das FEP für das FEP „Quellen des Bentonits“ von geringer Bedeutung.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Radiolyse (2.1.13.03)

Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

10.) Thermische Expansion oder Kontraktion (2.1.11.02)

Das FEP beschreibt die Volumenzunahme bzw. –abnahme des Wirtsgesteins, die durch die Einlagerung wärmeproduzierender Abfälle oder durch Klimaänderungen hervorgerufen werden. Das FEP wirkt über Spannungsänderungen im Gebirge indirekt auf die Funktion der ewB ein.

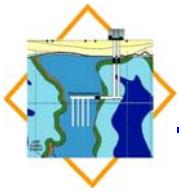
Das FEP umfasst neben der Expansion des Gebirges durch Aufheizung infolge des radioaktiven Zerfalls der Abfälle auch Kontraktionen, die im Gebirge und in den Schachtverschlüssen bei Abklingen der Zerfallswärme sowie im Zuge von Kaltzeiten mit Permafrost auftreten. Während die Spannungsänderungen bei Abklingen des radioaktiven Zerfalls durch die Auslegung der Schachtverschlüsse abgedeckt werden, kann es bei einer Kaltzeit mit tiefreichendem Permafrost zu Spannungen in den Baumaterialien der Schachtverschlüsse kommen, die deren Funktion beeinträchtigen. Derartige Klimaentwicklungen werden frühestens in 50.000 Jahren erwartet und treten erst nach der erforderlichen Standzeit der Schachtverschlüsse auf und haben so keine langzeitsicherheitliche Bedeutung.

Da die Spannungsänderungen im Wirtsgestein infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle durch die Auslegung der Barrieren abgedeckt wird, ist das FEP für das FEP „Quellen des Bentonits“ nur von geringer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Wirtsgestein (2.2.02.01)

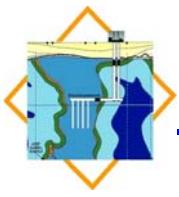
11.) Auflockerungszone (2.2.01.01)

Die Auflockerungszone ist ein konturnah begrenzter und geschädigter Bereich des den Grubenraum umgebenden Wirtsgesteins. Entstanden ist er durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes und die damit verbundene Spannungsumlagerung von der Hohlraumkontur ins Gebirge. Das FEP wirkt sich direkt auf die ewB Strecken- und Schachtverschlüsse aus.

Um Umläufigkeiten im Bereich der Schachtverschlüsse zu vermeiden, sieht das Errichtungskonzept vor, dass die beim Abteufen entstandene Auflockerungszone im Bereich der Dichtelemente mit möglichst gebirgsschonenden Verfahren entfernt wird. Die verbleibende und nicht zu vermeidende Rest-Auflockerungszone wird später durch den Quelldruck des Bentonits und die Konvergenz des Gebirges wieder verheilen bzw. bei Errichtung der Schachtverschlüsse durch Zementinjektionen vergütet.

Die Auflockerungszone hat keine relevanten Auswirkungen auf das FEP „Quellen des Bentonits“.

Nach der Revision wird das FEP „Rissbildung“ (2.1.07.06) in der Version 2 des Kataloges inhaltlich eingegliedert.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Rissbildung (2.1.07.06) (Revision: entfällt)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

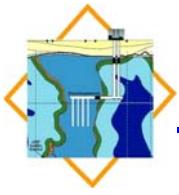
Thermisch bedingte Spannungsänderung im Wirtsgestein (2.2.10.03)

12.) Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

Fluidvorkommen sind natürlich vorhandene Flüssigkeiten und Gase im Wirtsgestein. Das FEP stellt eine mit Ungewissheiten behaftete Randbedingung dar, die sich direkt auf die Funktion der ewB auswirkt.

Am Referenzstandort sind die Fluidvorkommen an bestimmte stratigraphische Einheiten gebunden. Die meisten Lösungs- und Gaszutritte wurden in anhydritischen Gesteinen der Leine-Folge beobachtet. In dieser Formation sind auch die beiden Schächte am Referenzstandort angeordnet. Die hier beobachteten Lösungen sind durchweg an Steinsalz, z. T. auch an Sylvin oder Carnallit gesättigt. Diese Lösungen könnten entsprechend ihrem Chemismus auch die Funktion des Bentonits in den Dichtelementen beeinträchtigen, da mit zunehmender Salinität das Quellvermögen und die Sorptionskapazität des Bentonits abnehmen. Aufgrund der weitreichenden Erkundung in den Schachtbereichen ist aber hier ein erneuter Lösungszutritt in der Nachbetriebsphase wenig wahrscheinlich.

Aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit größerer Fluidvorkommen im Schachtbereich oder im Grubengebäude ist das FEP für das FEP „Quellen des Bentonits“ von geringer Bedeutung.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Wirtsgestein (2.2.02.01)
- Klüfte im Wirtsgestein (2.2.02.02)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Diapirismus (1.2.09.01)
- Radiolyse (2.1.13.03)

4.11.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

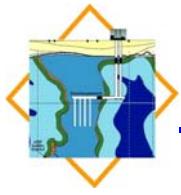
Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Das Quellen des Bentonits, der als Baumaterial für die Dichtelemente der Schachtverschlüsse eingesetzt wird, wird durch das Durchströmen der Barriere durch Flüssigkeiten ausgelöst. Bei der Normalentwicklung des Referenzstandortes handelt es sich um Grundwässer, die aus dem Deckgebirge den Schächten zufließen. Lösungszutritte aus dem Salinar sind geringwahrscheinlich und deshalb für das Referenzszenario nicht zu betrachten.

Wichtige Randbedingungen für das Quellen des Bentonits sind die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Verschlussmaterialien. Durch diese FEPs werden der Stoffbestand und die chemo-physikalischen Eigenschaften festgelegt, die für Prozesse beim Quellen des Bentonits entscheidend sind.

Die Konvergenz wirkt dem Bentonit-Quellen entgegen 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.

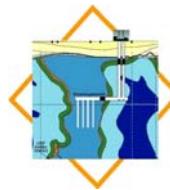
Der Zutritt von Grundwässern mit geändertem Chemismus, etwa aufgrund geänderter hydrogeologischer Verhältnisse infolge einer Kaltzeit, kann die Funktionalität der Dichtelemente beeinträchtigen (Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen), da das Quellvermögen und die Sorptionskapazität des Bentonits mit zunehmender Salinität des Grundwassers abnimmt.



Beeinträchtigungen der Baumaterialien der Schachtverschlüsse durch Spannungsänderungen während einer Kaltzeit sind nicht relevant für die Langzeitsicherheit, da derartige Klimaentwicklungen erst nach Ablauf der erforderlichen Barrierenstandzeiten auftreten werden.

Alle anderen beeinflussenden FEPs werden entweder von der Auslegung der Schachtverschlüsse abgedeckt oder besitzen nur eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit.

Aus den beeinflussenden FEPs der 2. Ebene ergeben sich zusätzliche Beeinflussungen des FEPs „Quellens des Bentonits“ durch die Randbedingungen „Fluiddruck“ und „Permeabilität“.



4.11. FEP Quellen des Bentonits (2.1.08.08.)

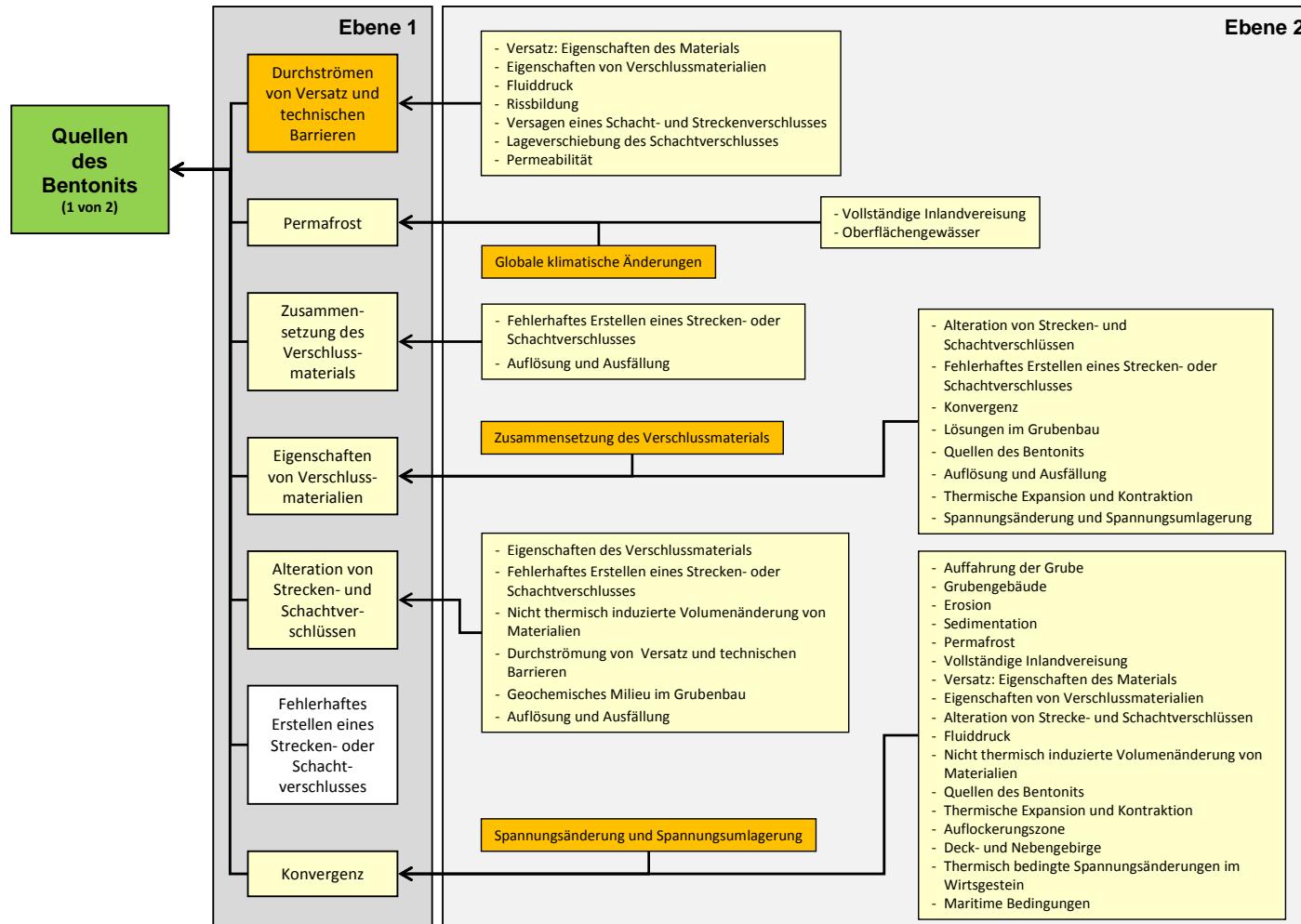
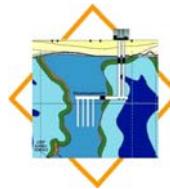


Abb. 15: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Quellen des Bentonits (Teil 1) bis in die 2. Ebene.



4.11.
FEP Quellen des Bentonits (2.1.08.08.)

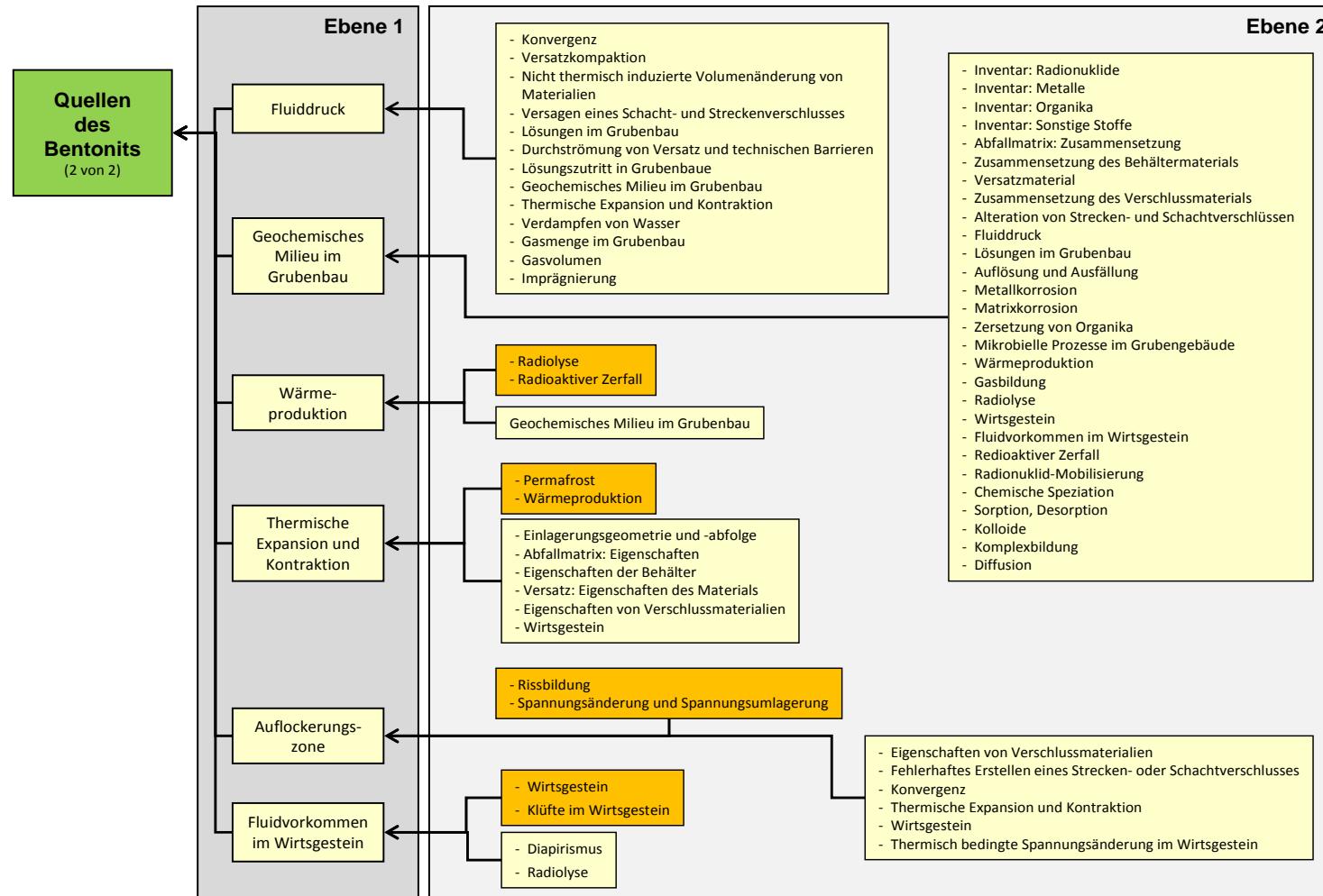
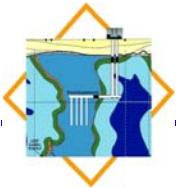


Abb. 16: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Quellen des Bentonits (Teil 2) bis in die 2. Ebene.



4.12. FEP Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Eine direkte Einwirkung besteht auf die ewB „Wirtsgestein“ und „Strecken- und Schachtverschlüsse“. Das FEP wird in allen Teilsystemen berücksichtigt und steht in Abhängigkeit zum geochemischen Milieu.

Der Prozess der sowohl chemischen als auch mechanischen Abtragung des Salzgestein durch Grundwasser (Subrosion) wird gesondert behandelt, siehe Kapitel 4.2.

4.12.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Die Anwesenheit von Lösungen ist Voraussetzung für die Auflösung des Wirtsgesteins, des Versatzes oder der Verschlussbauwerke. Nur bei untersättigten Lösungen können Auflösungsvorgänge auftreten. Die begrenzten Lösungsmengen limitieren die Bedeutung der Auflösungsvorgänge im Referenzszenario.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Diapirismus (1.2.09.01) (Revision: entfällt als beeinflussendes FEP)

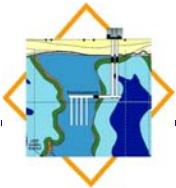
Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Radiolyse (2.1.13.03)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

Thermomigration (2.2.10.05)



B.) Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Das Verdampfen von Wasser verringert eventuell vorhandene Lösungsmengen und führt so zu einer Ausfällung von Stoffen. Nur in der Nähe der Abfälle sind die Temperaturen hoch genug, um ein Verdampfen von Wasser zu ermöglichen. Die Ausfällung von Stoffen ist im Referenzszenario unproblematisch.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Fluiddruck (2.1.07.03)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

4.12.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Versatzmaterial (2.1.04.01)

Die Zusammensetzung des eingebrachten Versatzmaterials bestimmt dessen Löslichkeit. Im betrachteten Endlagerkonzept wird Salzgrus (Steinsalz) verwendet. Die im Referenzszenario betrachteten Lösungen stehen im thermodynamischen Gleichgewicht mit Steinsalz. Eine signifikante Auflösung von Versatzmaterial ist daher im Referenzszenario nicht zu betrachten.

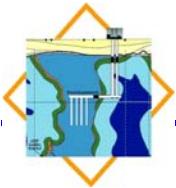
Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Radiolyse (2.1.13.03)



2.) Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01)

Die Zusammensetzung des Verschlussmaterials bestimmt dessen Löslichkeit. Eine Auflösung von Materialbestandteilen der Verschlussbauwerke kann über die langen zu betrachtenden Zeiträume nicht ausgeschlossen werden. Dies kann zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit dieser Bauwerke führen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

3.) Fluiddruck (2.1.07.03)

Der Fluiddruck spielt eine wichtige Rolle für alle chemischen Prozesse. Die Druckabhängigkeit vieler Lösungsprozesse ist zu berücksichtigen. In der Regel bedeutet ein höherer Druck eine höhere Löslichkeit.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Konvergenz (2.1.07.01) (*zusätzlich aufgenommen s. Kapitel 4.8.2*)

Versatzkompaktion (2.1.07.04)

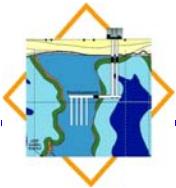
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Durchströmen von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)



- Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)
- Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)
- Gasvolumen (2.1.12.03)
- Imprägnierung (2.1.12.06) (Revision: geht in „Gasinfiltration ins Salzgestein“ (2.2.11.01) auf)*

4.) Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Umfang und Geschwindigkeit von Lösungs-Fällungs-Reaktionen sind stark abhängig vom geochemischen Milieu. Das „Geochemische Milieu“ ist ein wichtiges beeinflussendes FEP im Zusammenspiel mit den vorhandenen Lösungsmengen. Im Referenzszenario ist im Grubengebäude von Lösungen auszugehen, die im thermodynamischen Gleichgewicht mit den anstehenden Mineralphasen stehen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)

Inventar: Metalle (2.1.01.02)

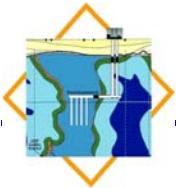
Inventar: Organika (2.1.01.03)

Inventar: Sonstige Stoffe (2.1.01.04)

Abfallmatrix: Zusammensetzung (2.1.02.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Eigenschaften“ (2.1.02.02))

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02))

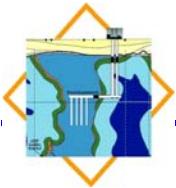
Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))



- Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))*
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)
- Fluiddruck (2.1.07.03)
- Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Matrixkorrosion (2.1.09.04)
- Zersetzung von Organika (2.1.10.01)
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)
- Wärmebildung (2.1.11.01)
- Gasbildung (2.1.12.01)
- Radiolyse (2.1.13.03)
- Wirtsgestein (2.2.02.01)
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)
- Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)
- Radionuklid-Mobilisierung (3.2.01.02)
- Chemische Speziation (3.2.02.01) (Revision: entfällt)*
- Sorption, Desorption (3.2.03.01)
- Kolloide (3.2.04.01)
- Komplexbildung (3.2.05.01)
- Diffusion (3.2.07.04)

5.) Wärmebildung (2.1.11.01)

Die Änderung der Temperatur spielt eine wichtige Rolle für alle chemischen Prozesse. Die auslösenden FEPs der „Wärmebildung“ sind „Radiolyse“ und „Radioaktiver Zerfall“. Letztere ist aufgrund des geringen Angebots an Lösungen nur schwach ausgeprägt und hat keinen großen Einfluss im Referenzszenario. Des Weiteren berücksichtigt das Einlagerungskonzept das Temperaturkriterium von 200°C und gewährleistet so einen beherrschbaren Einfluss der durch die ionisierende Strahlung ausgelösten Temperaturerhöhung in den unterschiedlichen Teilsystemen.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Radiolyse (2.1.13.03)

Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

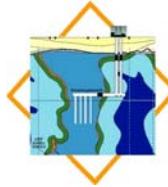
Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

4.12.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Auch bei den geringen Lösungsmengen, die im Grubengebäude, insbesondere in der Nähe der Einlagerungsbereiche, im Referenzszenario zu betrachten sind, sind Auflösungsprozesse aufgrund der langen zu betrachtenden Zeiträume zu erwarten. Da die vorhandenen Lösungen im thermodynamischen Gleichgewicht mit den Mineralphasen des Hauptsalzes stehen, sind davon im Wesentlichen nur einige Komponenten der Verschlussbauwerke betroffen. Bei den Verschlussbauwerken ist daher im Referenzszenario für lange Zeiträume eine Erhöhung der Durchlässigkeit nicht auszuschließen, die unter anderem auf die Auflösungsprozesse im Endlager zurückzuführen ist. Gemäß den Prämissen des Referenzszenarios wird eine solche Erhöhung aber erst nach der bestimmungsgemäßen Lebensdauer der Verschlussbauwerke relevant.



4.12. FEP Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

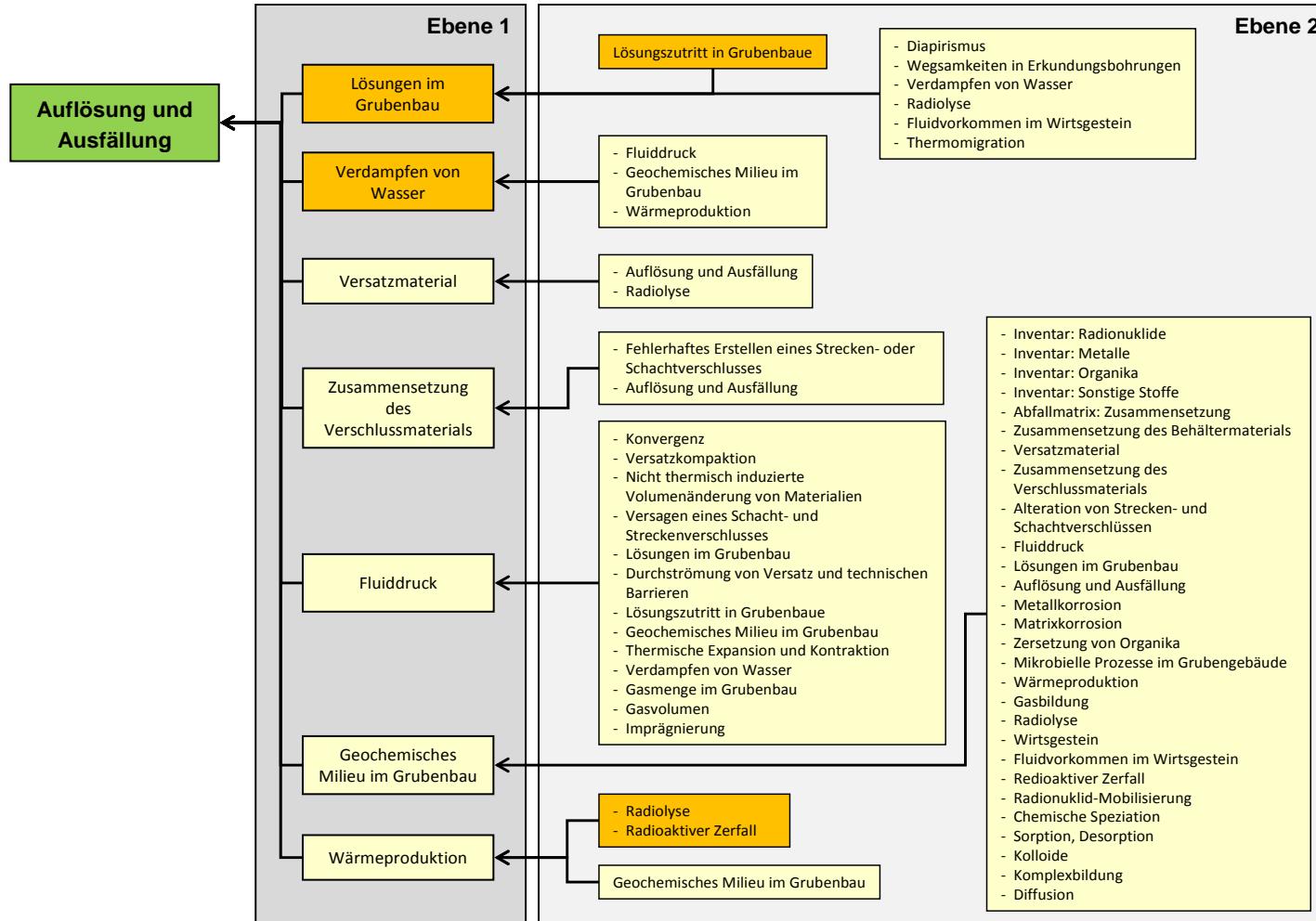


Abb. 17: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Auflösung und Ausfällung bis in die 2. Ebene.



4.13. FEP Metallkorrosion (2.1.09.03)

Die Metallkorrosion hat eine direkte Einwirkung auf die ewB „Behälter“. Sie wird berücksichtigt in den Teilsystemen „Nahfeld“ und „Strecken und Schächte“. Wichtig ist die Metallkorrosion im Nahfeld. Ihre Ausprägung hat großen Einfluss auf die Konsequenzen eines Szenarios.

In der Version 2 des FEP-Kataloges werden Behälter nicht mehr als einschlusswirksame Barriere angesehen. Dann entfällt die „Metallkorrosion“ als zu betrachtendes FEP im Referenzszenario. Das FEP „Metallkorrosion“ wird als auslösendes bzw. beeinflussendes FEP weiter berücksichtigt.

4.13.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Die Anwesenheit von Lösung ist eine notwendige und die wichtigste Voraussetzung für die Metallkorrosion. Begrenzte Lösungsmengen limitieren somit die Bedeutung der Metallkorrosion.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Diapirismus (1.2.09.01) (Revision: entfällt als beeinflussendes FEP)

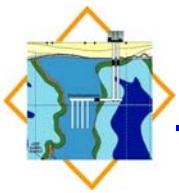
Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.5.03.01)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Radiolyse (2.1.13.03)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

Thermomigration (2.2.10.05)



4.13.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Inventar: Metalle (2.1.01.02)

Der entscheidende Einfluss auf den Prozess der Korrosion erfolgt über die Eigenschaften der Behälter und das geochemische Milieu. Das FEP ist daher bei der Beurteilung der Ausprägung der Metallkorrosion nicht zu berücksichtigen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02))

Technische Einrichtungen (2.1.06.01)

Metallkorrosion (2.1.09.03)

Strahlungsinduzierte Aktivierung (2.1.13.01)

2.) Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02)

Die Eigenschaften der Behälter wirken sich auf den Umfang und die Geschwindigkeit der Korrosion aus. Maßgeblich sind unter anderem Korrosionsraten, Wandstärke, Sorptionseigenschaften usw. wichtig im Zusammenspiel mit dem geochemischen Milieu.

Die in Frage kommenden Behältermaterialien sind im Wesentlichen Gusseisen, Edelstahl oder Feinkornbaustahl. Die Wandstärken betragen zwischen 5 mm (CSD) und 40 mm (BSK), bei POLLUX-Behältern noch deutlich mehr. Der Einfluss der Behältermaterialien auf die Metallkorrosion hängt entscheidend vom geochemischen Milieu der in den Einlagerungsbereichen vorhandenen Lösungen ab.

In der Version 2 des FEP-Kataloges wird dieses FEP mit dem FEP „Behältermaterial“ zu dem FEP „Behälter“ zusammengelegt. Als beeinflussendes FEP wird das FEP „Inventar: Metalle“ hinzugefügt (s.u.).



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Zersetzung von Organika (2.1.10.01)
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Materialversprödung durch Strahlung (2.1.13.02)
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

3.) Flieiddruck (2.1.07.03)

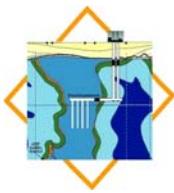
Der direkte Einfluss des Flieiddrucks auf die Metallkorrosion ist vergleichsweise gering und kann über den Einfluss des Druckes auf das geochemische Milieu berücksichtigt werden.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Konvergenz (2.1.07.01) (zusätzlich aufgenommen s. a. Kapitel 4.8.2)*
- Versatzkompaktion (2.1.07.04)
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)
- Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)
- Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)
- Durchströmen von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)
- Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)



- Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)
- Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)
- Gasvolumen (2.1.12.03)
- Imprägnierung (2.1.12.06) (Revision: geht in „Gasinfiltration ins Salzgestein“ (2.2.11.01) auf)*

4.) Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Der Umfang und die Geschwindigkeit der Korrosion sind stark abhängig vom geochemischen Milieu. Das geochemische Milieu bildet damit ein wichtiges beeinflussendes FEP für die Metallkorrosion im Zusammenspiel mit den vorhandenen Lösungsmengen. Für das Referenzszenario ist nur das geochemische Milieu der Restfeuchte im Versatz und der Gebirgsfeuchte zu betrachten.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)

Inventar: Metalle (2.1.01.02)

Inventar: Organika (2.1.01.03)

Inventar: Sonstige Stoffe (2.1.01.04)

Abfallmatrix: Zusammensetzung (2.1.02.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Eigenschaften“ (2.1.02.02))

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02))

Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))



- Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))*
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)*
- Fluiddruck (2.1.07.03)*
- Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)*
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)*
- Metallkorrosion (2.1.09.03)*
- Matrixkorrosion (2.1.09.04)*
- Zersetzung von Organika (2.1.10.01)*
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)*
- Wärmeleitung (2.1.11.01)*
- Gasbildung (2.1.12.01)*
- Radiolyse (2.1.13.03)*
- Wirtsgestein (2.2.02.01)*
- Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)*
- Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)*
- Radionuklid-Mobilisierung (3.2.01.02)*
- Chemische Speziation (3.2.02.01)*
- Sorption, Desorption (3.2.03.01)*
- Kolloide (3.2.04.01)*
- Komplexbildung (3.2.05.01)*
- Diffusion (3.2.07.04)*

5.) Wärmeleitung (2.1.11.01)

Der Temperatureinfluss auf die Metallkorrosion ist im Referenzszenario zu berücksichtigen. Entsprechend dem Endlagerkonzept beträgt die maximal zu betrachtende Temperatur an der Behälteroberfläche 200°C.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Radiolyse (2.1.13.03)

Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

6.) Materialversprödung durch Strahlung (2.1.13.02)

Eine Materialversprödung durch Strahlung hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Metallkorrosion. Sie ist daher nicht zu berücksichtigen.

Das FEP wird in der Version 2 des FEP-Kataloges als wenig wahrscheinlich eingestuft und braucht dann im Referenzszenario nicht mehr berücksichtigt zu werden.

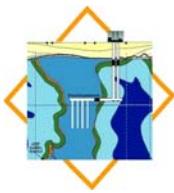
Auslösende FEPs (2. Ebene):

Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Metalle (2.1.01.02)

Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))



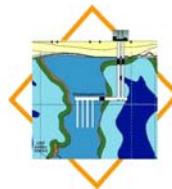
4.13.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Metallkorrosion (2.1.09.03)

Unter den gegebenen Annahmen sind im Referenzszenario die für die Korrosion verfügbaren Feuchtemengen begrenzt. Die Feuchte in den eingelagerten Endlagergebinden ist vernachlässigbar, die Feuchte von unterirdisch auf Halde gelagertem Hauptsalz der Staßfurtserie wird etwa 2% betragen, die Gebirgsfeuchte liegt mit 0,02% zwei Größenordnungen darunter. Da kein Fremdmaterial als Versatzmaterial eingesetzt wird, ist für das Referenzszenario die von außen angreifende Feuchte als NaCl-Lösung anzusetzen. Als Temperaturmaximum sind an der Behälteroberfläche entsprechend dem Endlagerkonzept 200°C anzusetzen.

Für solche Bedingungen betragen die flächenhaften Korrosionsraten für die betrachteten Behältermaterialien zwischen 2 (Edelstahl, CSD) und 15 µm/a (Feinkornbaustahl, BSK). Aufgrund der begrenzten Lösungsmengen kommt die Korrosion nach einigen Hunderten von Jahren zum Erliegen, die Eindringtiefe beträgt weniger als 0,5 mm (MÜLLER, W & THOLEN, M. 2009). Für POLLUX-Behälter sind höhere Eindringtiefen anzusetzen, aufgrund der hohen Wandstärke spielt für die Behälterintegrität dieser Gebinde die Metallkorrosion im Referenzszenario ebenfalls keine Rolle. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Behälterversagen alleine durch flächenhafte Korrosion für das Referenzszenario ausgeschlossen werden kann. Lokale Korrosioneffekte müssen aber im Referenzszenario berücksichtigt werden, da sie eventuell auch bei geringen Feuchtemengen zu einem Ausfall einiger Behälter führen können (MÜLLER, W & THOLEN, M. 2009).

In der Version 2 des FEP-Kataloges werden Behälter nicht mehr als einschlusswirksame Barriere angesehen. Dann entfällt die „Metallkorrosion“ als zu betrachtendes FEP im Referenzszenario. Das FEP „Metallkorrosion“ wird als auslösendes bzw. beeinflussendes FEP weiter berücksichtigt.



4.13 FEP Metallkorrosion (2.1.09.03)

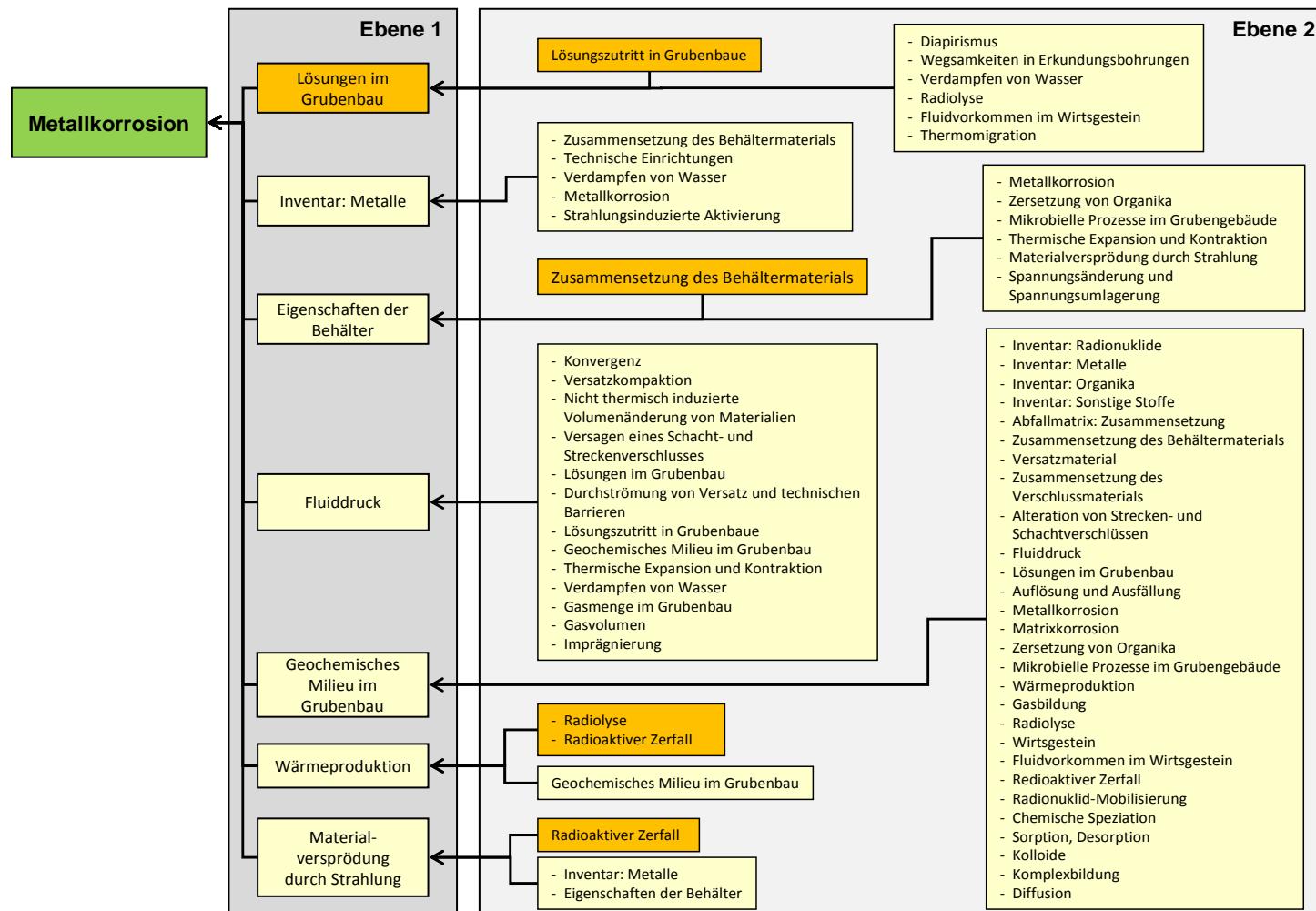


Abb. 18: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Metallkorrosion bis in die 2. Ebene.



4.14. FEP Imprägnierung (2.1.12.06)

Das FEP „Imprägnierung“ hat eine direkte Einwirkung auf die einschlusswirksame Barriere Wirtsgestein. Es wird auch nur in diesem Teilsystem berücksichtigt.

In der Version 2 des FEP-Kataloges wird das FEP in seiner gegenwärtigen Form entfernt. Teilweise werden die Inhalte in das neue FEP „Gasinfiltation ins Salzgestein“ aufgenommen.

Dort werden vor allem die Ergebnisse des Forschungsvorhabens SR 2470 berücksichtigt, die einen Gasfrac des Salzgesteins aufgrund einer sich reversibel bildenden Sekundärpermeabilität ausschließen (POPP, T., WIEDEMANN, M. et al. 2007). Eine Bewertung dieses neuen FEPs hinsichtlich seiner auslösenden und beeinflussenden FEPs und der Wirksamkeit auf die einschlusswirksamen Barrieren steht noch aus, dieser Prozesses hat aber keinen negativen Einfluss auf eine einschlusswirksame Barriere. Daher entfällt dieses Kapitel in der Betrachtung des Referenzszenarios in einer zukünftigen Version.

4.14.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

Keine identifiziert.

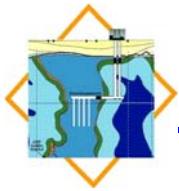
4.14.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.02)

Wichtig für die Gasmenge im Grubenbau ist die Gasbildung, die im Referenzszenario aber aufgrund des geringen Wasserdargebots sehr schwach ausgeprägt ist. Die Gasmenge im Grubenbau entspricht somit im Wesentlichen der Menge der im Porenraum vorhandenen Luft.

Auslösendes FEPs (2. Ebene):

Gasbildung (2.1.12.01)



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (1.1.05.03)

Imprägnierung (2.1.12.06) (Revision: geht in „Gasinfiltration ins Salzgestein“ (2.2.11.01) auf)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

2.) Wirtsgestein (2.2.02.01)

Der Zustand des Wirtsgesteins ist entscheidend für eine mögliche Imprägnierung. Im Salzgestein kommt es bei erhöhten Fluiddrücken zur Ausbildung einer Sekundärpermeabilität, die selbstverheilend ist.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Diapirismus (1.2.09.01)

Subrosion (1.2.09.02)

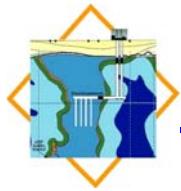
Permafrost (1.3.04.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Radiolyse (2.1.13.03)



4.14.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP Imprägnierung (2.1.12.06)

Bei Gasdrücken im Niveau des lithostatischen Druckes kann das im Porenraum des Versatzes vorhandene Gas in das Wirtsgestein Salz unter Bildung von fein verteilten Wegsamkeiten eindringen.

Ein gegebenenfalls erhöhter Fluiaddruck kann sich über diese Permeabilität abbauen. Nach Abbau des Fluiaddrucks verschließt sich das Wirtsgestein wieder (POPP, T., WIEDEMANN, M. et al. 2007). (Bei hohen Drücken, die aber im Referenzszenario aufgrund der geringen Gasbildung nicht erwartet werden, würde dieser Prozess zu einem gewünschten Druckabbau führen.)

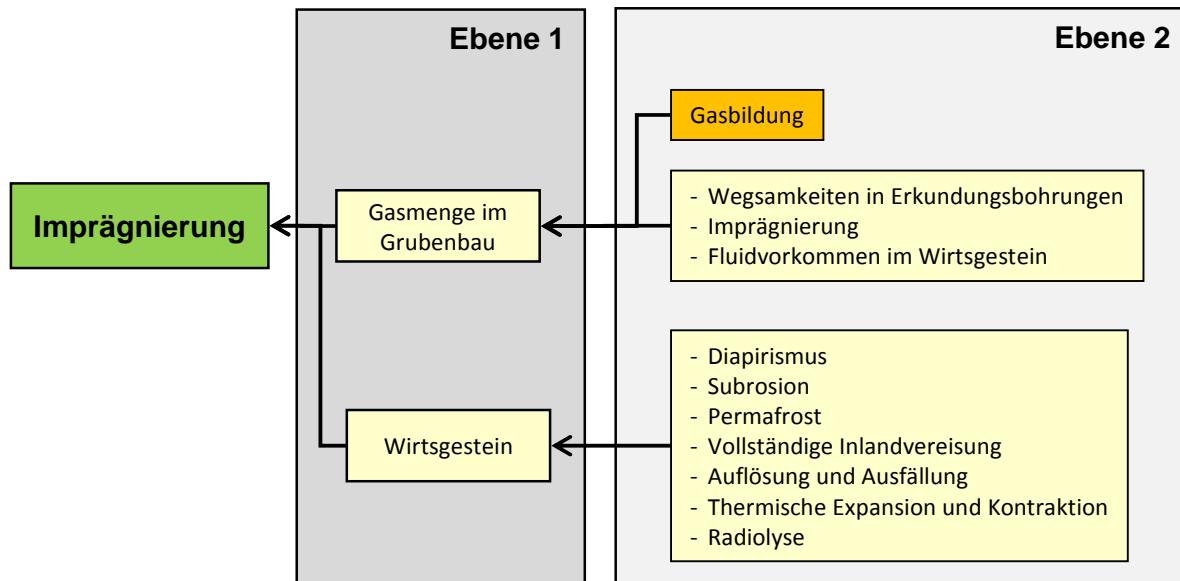


Abb. 19: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Imprägnierung bis in die 2. Ebene.



4.15. FEP Auflockerungszone (2.2.01.01)

Die Auflockerungszone ist ein aufgelockerter Bereich an der Kontur eines Grubenraums, der durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes und die damit verbundene Spannungsumlagerung von der Hohlraumkontur ins Gebirge entstanden ist. Das FEP wirkt sich direkt auf die Funktion von Strecken- und Schachtverschlüssen sowie das Wirtsgestein aus.

Nach der Revision wird das FEP „Rissbildung“ in der Version 2 des FEP-Kataloges inhaltlich eingegliedert.

4.15.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Rissbildung (2.1.07.06)

Die Rissbildung ist ein Prozess, der nach einer thermischen oder mechanischen Beanspruchung oberhalb der Schädigungsgrenze in Feststoffen erst zu mikroskopischen und im weiteren Verlauf auch zu makroskopischen Fissuren im Feststoffgefüge führt. Das FEP hat direkte Auswirkungen auf die Funktion geotechnischer Barrieren und des Wirtsgesteins.

Nach der Auffahrung der Grubenräume kommt es zu Spannungsumlagerungen im Gebirge und zur Spannungskonzentration im Konturbereich. In der Folge entstehen konturnahe Risse, die die Auflockerungszone bilden. Bei einer Vernetzung der Risse können in den Auflockerungszonen hydraulische Wegsamkeiten entstehen. Durch die Stabilisierung der Grubenräume mit Versatz kommt die Rissbildung mit zunehmender Stützwirkung zum Erliegen und die Risse können sich schließen. Damit sind aber die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteins noch nicht wiederhergestellt. Ein Verheilen der Risse setzt voraus, dass entweder Kristalle auf der Rissfläche rekristallisieren oder dass Salze aus Fluiden in den Risse auskristallisieren.

Das FEP fällt bei der Revision des FEP-Kataloges weg, da die resultierenden sicherheitsrelevanten Entwicklungen im FEP „Auflockerungszone“ behandelt werden.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Lageverschiebung des Schachtverschlusses (2.1.07.08)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird inhaltlich eingegliedert)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.02)

B.) Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Spannungsänderungen beschreiben reversible Änderungen des Beanspruchungszustandes im Wirtsgestein und in geotechnischen Bauwerken, während Spannungsumlagerungen Ausgleichsprozesse mit irreversiblen Deformationen darstellen. Diese Prozesse haben direkte Auswirkungen auf die Funktion der geotechnischen Barrieren und des Wirtsgesteins.

Im ungestörten Salzgebirge liegt normalerweise ein isotroper Primärspannungszustand vor, der durch die Erstellung des Grubengebäudes gestört wird. In der Folge bildet sich ein Sekundärspannungszustand an der Grubenraumkontur, der zu dilatanten Verformungen und damit zu Spannungsumlagerungen unter Ausbildung einer Auflockerungszone mit Fissuren führt.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Auffahrung der Grube (1.1.02.01) (Revision: entfällt)
Fluiddruck (2.1.07.03)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)
Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))
Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))
Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))
Versatzkompaktion (2.1.07.04)
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)
Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)
Quellen des Bentonits (2.1.08.08)
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
Wirtsgestein (2.2.02.01)

4.15.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Wirtsgestein (2.2.02.01)

Das FEP ist eine Randbedingung und beschreibt alle geologischen und physiko-chemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins.

Da die Ausprägung der Auflockerungszone und die Prozesse des Aufreißens und Schließen bzw. des Verheilens der Risse von den jeweiligen Gesteinstypen abhängen, ist das FEP wichtig für das FEP „Auflockerungszone“.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Diapirismus (1.2.09.01)
- Subrosion (1.2.09.02)
- Permafrost (1.3.04.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Radiolyse (2.1.13.03)

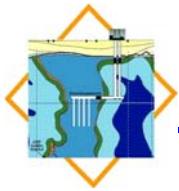
2.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

Das FEP ist eine Randbedingung und beschreibt die chemo-physikalischen Eigenschaften der Baustoffe für die Verschlussbauwerke. Die Baustoffeigenschaften haben direkte Einwirkungen auf die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse.

Zu den Eigenschaften von Verschlussmaterialien, die sich mittelbar auf die Auflockerungszone auswirken können, zählen die Druckfestigkeit und das Quellvermögen. Die Druckfestigkeit z. B. von Betonbarrieren führt zu einem Stützdruck, der der Konvergenz entgegen wirkt, dabei werden sich die Risse der Auflockerungszone schließen und verheilen. Das Quellen von Verschlussmaterialien – in geringem Umfang beim Beton, wichtig beim Bentonit – führt zu einem raschen Druckaufbau gegen die Hohlraumkontur und die Konvergenz was ebenfalls zu einem Schließen der Risse in der Auflockerungszone führt.

Das FEP ist wichtig für die Ausprägung des FEPs „Auflockerungszone“.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ und „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ zusammengefasst.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.01)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

3.) Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

4.) Konvergenz (2.1.07.01)

Konvergenz bezeichnet die Querschnittsverkleinerung von Grubenräumen durch das Salzkriechen, das durch Spannungsumlagerungen im Gebirge nach der Auffahrung der Grubenräume ausgelöst wird. Dieser Prozess wirkt sich direkt auf die Funktion aller einschlusswirksamen Barrieren aus.

Wenn das Gebirge durch Konvergenz auf hochkompaktierten Versatz oder ein Verschlussbauwerk aufläuft, baut sich ein Stützdruck auf, der dazu führt, dass sich die Risse in der Auflockerungszone schließen und – falls Salze auf der Rissfläche rekristallisieren oder in den Fluiden gelöste Salze in den Rissen auskristallisieren – wieder verheilen.



Das FEP ist wichtig für die Ausprägung des FEPs „Auflockerungszone“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene) :

Auffahrung der Grube (1.1.02.01) (Revision: entfällt)

Grubengebäude (1.1.02.03) (Revision: entfällt)

Erosion (1.2.07.01)

Sedimentation (1.2.07.02)

Permafrost (1.3.04.01)

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fluiddruck (2.1.07.03)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05).

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

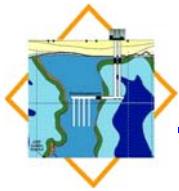
Deck- und Nebengebirge (2.2.03.01)

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Maritime Bedingungen (2.3.06.01) (Revision: entfällt)

5.) Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Das FEP beschreibt die Volumenzunahme bzw. –abnahme der Salinargesteine, die durch eine Temperaturveränderung hervorgerufen werden. Das FEP wirkt über Span-



nungsänderungen im Gebirge indirekt auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren ein.

Die thermische Expansion des Salzgebirges durch die Aufheizung infolge der Zerfalls-wärme der radioaktiven Abfälle führt zu einer beschleunigten Konvergenz und nach dem Auflaufen auf den kompaktierten Versatz oder die Barrieren zu einem raschen Schließen der Risse in der Auflockerungszone.

Nach Abklingen der Zerfallswärme oder durch eine tiefreichende Abkühlung des Gebirges infolge einer Kaltzeit mit Permafrost kann es zu Kontraktionen des Gebirges kommen, die zu einem erneuten Aufreißen der Auflockerungszone in den Schächten führen können.

Klimaeinflüsse wirken sich entsprechend ihrer begrenzten Eindringtiefe in die Gesteine nur auf die Schächte aus. An die Schächte bestehen aber zum Zeitpunkt einer Kaltzeit keine Anforderungen mehr bezüglich der Verschlusswirksamkeit.

Das FEP ist wichtig für die Ausprägung des FEPs „Auflockerungszone“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))

Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Wirtsgestein (2.2.02.01)



6.) Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle sowie durch die anschließende Abkühlung aufgrund nachlassender Wärmeproduktion oder infolge Abkühlung durch klimatischen Einfluss können im Wirtsgestein Spannungsänderungen auftreten. Das FEP hat direkten Einfluss auf die Funktion des Wirtsgesteins.

Die thermisch bedingten Spannungsänderungen können das Schließen oder Aufreißen von Rissen in der Auflockerungszone bewirken. Durch Expansion bedingte Spannungsänderungen führen zu einer beschleunigten Konvergenz und nach dem Auflaufen auf eine Barriere oder nach der Kompaktion des Salzgruses zum Schließen und Verheilen der Auflockerungszone. Nach Abklingen der Aufheizung und der damit verbundenen Gesteinskontraktion kann es zur Druckentlastung und damit auch zum Aufreißen neuer Risse in der Auflockerungszone kommen.

Das FEP ist wichtig für die Ausprägung des FEPs „Auflockerungszone“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Permafrost (1.3.04.01)

Wirtsgestein (2.2.02.01)



4.15.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Auflockerungszone (2.2.01.01)

Auslösende FEPs für das FEP „Auflockerungszone“ sind „Rissbildung“ und „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“. Die Änderungen der Gebirgsspannung werden durch die Auffahrung des Grubengebäudes ausgelöst. Durch Spannungsspitzen im Konturbereich bilden sich Risse, die sich zu einer Auflockerungszone vereinen.

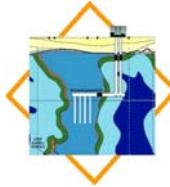
Wichtige Randbedingungen für die Ausprägung dieses FEP sind das Wirtsgestein, dessen Mineralogie, Struktur und Textur die Spannungsverteilung bestimmt, sowie die Eigenschaften von Verschlussmaterialien, die die Druckfestigkeit der Barriere und damit den Stützdruck bestimmen, mit dem die Barriere dem Gebirgsdruck entgegen wirkt.

Konvergenz kann, sobald sie auf hoch kompaktierten Versatz oder ein Verschlussbauwerk aufläuft, zur Ausbildung eines Stützdrucks führen, der zu einem Schließen und ggf. auch zu einem Verheilen der Risse in der Auflockerungszone führen kann.

Die thermische Expansion der Gesteine durch die Aufheizung infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle führt zu neuen Spannungen im Gebirge sowie zur beschleunigten Konvergenz und kann beim Auflaufen auf eine Barriere zum raschen Schließen von Rissen in der Auflockerungszone führen. Nach Abklingen der Aufheizung kommt es durch Gesteinskontraktion zu Zugspannungen, aus denen ein Wiederaufrütteln von Rissen in der Auflockerungszone resultieren kann.

Im Schachtbereich können klimatische Abkühlungen mit Permafrost zu Rissbildungen im Wirtsgestein und in den Barrieren führen. Da diese Einflüsse erst zu einem späten Zeitpunkt wirksam werden, sind sie nur von geringer sicherheitstechnischer Relevanz.

Zusätzliche Einflussfaktoren, die sich aus den auslösenden und beeinflussenden FEPs der 2. Ebene ergeben, sind die „Nicht thermisch induzierten Volumenänderungen“ von Verschlussmaterialien und die „Versatzkompaktion“, die beide zu einem Stützdruck führen, der dem Gebirgsdruck entgegen gerichtet ist, und damit das Schließen der Risse in der Auflockerungszone begünstigen. Von Bedeutung sind außerdem „Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen“, die sowohl zu einem Verschließen als auch zu einem Aufrütteln von Rissen führen können.



4.15 FEP Auflockerungszone (2.2.01.01)

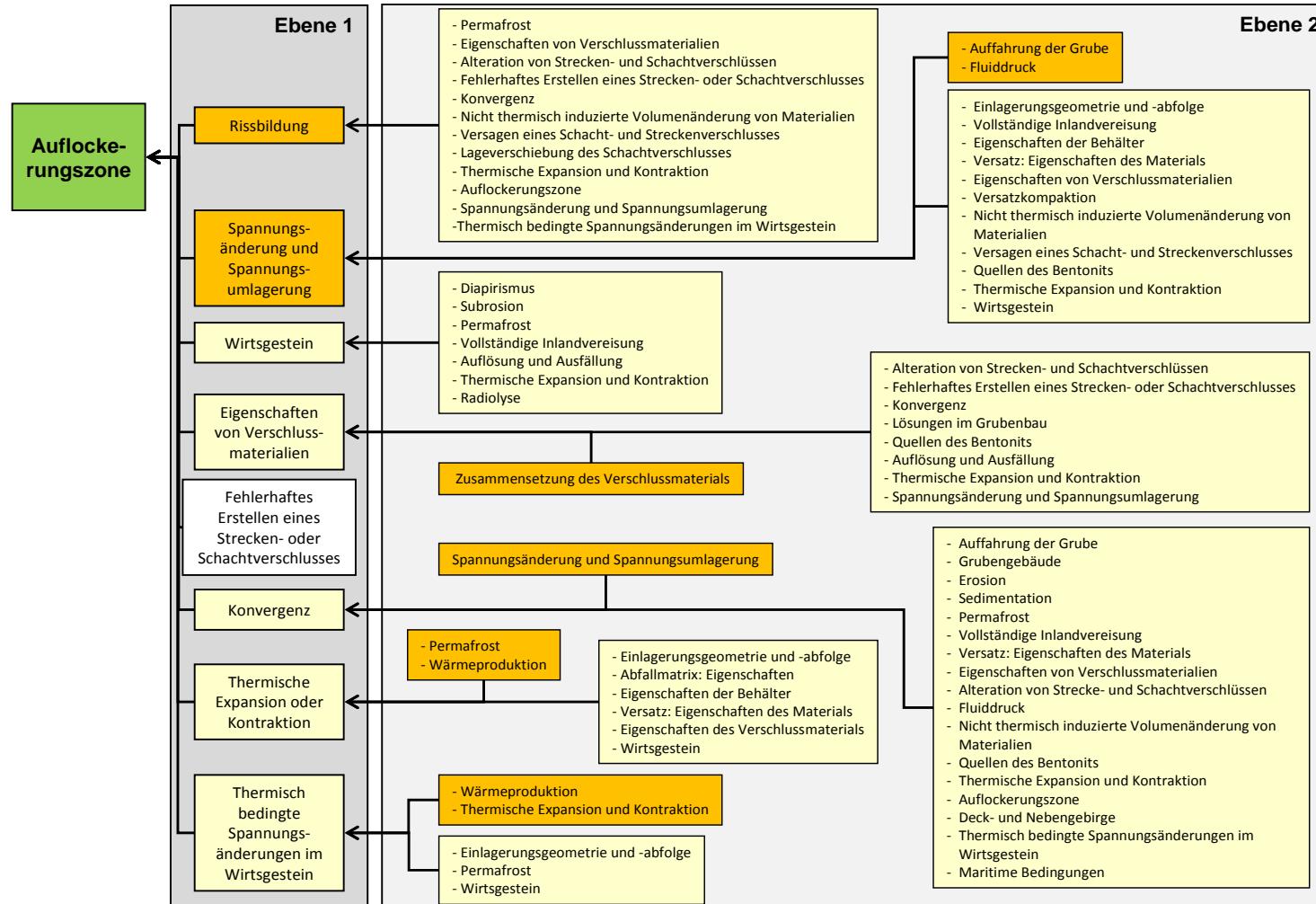
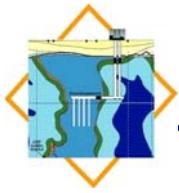


Abb. 20: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Auflockerungszone bis in die 2. Ebene.



4.16. FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Durch thermische oder mechanische Einflüsse sowie durch den Fluiddruck können die Spannungsverhältnisse im Salzgebirge und in den geotechnischen Barrieren beeinflusst werden. Dabei beschreiben Spannungsänderungen reversible Änderungen des Beanspruchungszustandes, während Spannungsumlagerungen Ausgleichsprozesse mit irreversiblen Deformationen darstellen. Das FEP zeigt direkte Einwirkungen auf die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse sowie des Wirtsgesteins.

4.16.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Auffahrung der Grube (1.1.02.01)

Die Randbedingung „Auffahrung des Grubengebäudes“ führt zu einer Störung des isotropen Primärspannungszustandes des Salzgebirges. Es folgen Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen, die einerseits zur Konvergenz und andererseits zu Spannungskonzentrationen an der Hohlraumkontur und zu dilatanten Verformungen (Rissbildung und Auflockerungszone) führen.

Da die sicherheitsrelevanten Aspekte der Auffahrung der Grube in anderen FEPs behandelt werden, wird das FEP nach der Revision des FEP-Kataloges wegfallen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.



B.) Fluiddruck (2.1.07.03)

Die Randbedingung Fluiddruck beschreibt den Druck von Lösungen und Gasen im Grubengebäude. Das FEP wirkt sich direkt auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren aus.

Bei der ungestörten Entwicklung des Endlagersystems wird der Fluiddruck nur von geringen Mengen Flüssigkeit, der Grubenluft sowie von der Gasbildung durch die Behälterkorrosion bestimmt. Diese Komponenten bilden einen Stützdruck, der dem Gebirgsdruck entgegenwirkt. Bei intensiver Gasbildung könnten zudem – falls ein Abströmen nicht möglich ist - Fluiddrucke entstehen, die über den lithostatischen Druck hinausgehen und zum Aufreißen von Rissen sowie zur Gasinfiltration in das Wirtsgestein führen könnten. Dies wird dadurch vermieden, dass das Endlagerkonzept entsprechende Wegsamkeiten und Speicherräume vorsieht, in die das Gas abströmen kann.

Falls Lösungen in das Grubengebäude zutreten, ist zusätzlich noch der Fluiddruck in der Flüssigkeit zu berücksichtigen. Dieser kann maximal dem lithostatischen Druck entsprechen und bildet ebenfalls einen Stützdruck.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Konvergenz (2.1.07.01) (*zusätzlich aufgenommen s. a. Kapitel 4.8.2*)

Versatzkompaktion (2.1.07.04)

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05)

Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

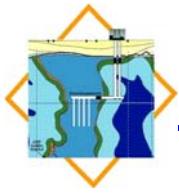
Lösungszutritt in Grubenbaue (2.1.08.07)

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Verdampfen von Wasser (2.1.11.03)

Gasmenge im Grubenbau (2.1.12.03)



Gasvolumen (2.1.12.03)

Imprägnierung (2.1.12.06) (Revision: geht in „Gasinfiltration ins Salzgestein“ (2.2.11.01) auf)

4.16.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01)

Die Randbedingung „Einlagerungsgeometrie und -abfolge“ beschreibt die räumliche Anordnung der Einlagerungshohlräume des Endlagers und die Abfolge der Abfalleinlagerung. Das FEP wirkt sich indirekt auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren aus.

Die Einlagerungsgeometrie und -abfolge ist wesentlich für den Wärmeeintrag in das Gebirge. Dabei dürfen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Einlagerungsfeldern 200°C im Salz nicht überschritten werden. Die Aufheizung führt zur thermischen Expansion der Gesteine und beeinflusst damit das Spannungsfeld im Gebirge.

Das FEP ist indirekt für das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ von Bedeutung.

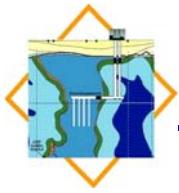
Da die Einlagerungsgeometrie eine unveränderliche und für alle Szenarien gleiche Randbedingung ist, entfällt das FEP bei der Revision des FEP-Kataloges. Die sicherheitsrelevanten Aspekte der Einlagerungsgeometrie und -abfolge werden in anderen FEPs behandelt.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.



2.) Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02)

Die Randbedingung „Eigenschaften der (beladenen) Behälter“ beschreibt alle Eigenschaften der Abfallgebinde. Im Zusammenhang mit den Spannungsverhältnissen im Gebirge ist vor allem die Behältersteifigkeit relevant.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Behältermaterials“ und „Eigenschaften des Behälters“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Behältermaterials (2.1.03.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Eigenschaften der Behälter“ (2.1.03.02))

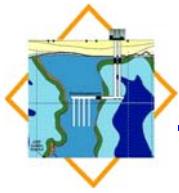
Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Zersetzung von Organika (2.1.10.01)
- Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (2.1.10.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Materialversprödung durch Strahlung (2.1.13.02)
- Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

3.) Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02)

Die Versatzeigenschaften sind ebenfalls eine Randbedingung. Sie bestimmen das Versatzverhalten gegen chemische, thermische, mechanische und andere physikalische Einwirkungen.

In seinen chemischen Eigenschaften ist der als Versatzmaterial verwendete Salzgrus dem jeweils umgebenden Salzgestein ähnlich, weist aber eine höhere Porosität und Feuchte auf. Er wird durch die Konvergenz, die durch den Gebirgsdruck ausgelöst wird, kompaktiert und soll langfristig ähnliche mechanische und hydraulische Eigenschaften wie das Salzgestein erreichen. Im Zuge der Kompaktion entwickelt der Ver-



satz einen zunehmenden Stützdruck gegen den Gebirgsdruck bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird.

Die Versatzeigenschaften sind wichtig für das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Versatzmaterials“ und „Eigenschaften des Versatzmaterials“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Versatzmaterial (2.1.04.01) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatz: Eigenschaften des Materials“ (2.1.04.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Konvergenz (2.1.07.01)
- Versatzkompaktion (2.1.07.04)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)
- Radiolyse (2.1.13.03)

4.) Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02)

Eine weitere wichtige Randbedingung sind die Eigenschaften von Verschlussmaterialien, die alle wesentlichen thermo-mechanischen und chemischen Merkmale des Materials charakterisieren. Das FEP wirkt sich direkt auf die Funktion der geotechnischen Barrieren aus.

Die Eigenschaften von Verschlussmaterialien, die sich unmittelbar auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge auswirken können, sind die Druckfestigkeit und das Quellvermögen. So führt die Druckfestigkeit, z. B. von Betonbarrieren, bei Auflaufen des Gebirges zu einem Stützdruck, der dem Gebirgsdruck entgegen wirkt.

Ein Quellen des Verschlussmaterials tritt in geringem Umfang beim Beton und in wesentlichem Umfang beim Bentonit auf, der als Dichtmaterial in Schachtverschlüssen



verwendet wird. Durch angepasste Materialrezepturen und ein entsprechendes Vorgehen beim Einbau wird sichergestellt, dass der jeweilige Quelldruck die Integrität des Wirtsgesteins nicht beeinträchtigt.

Von den Eigenschaften von Verschlussmaterialien ist vor allem die Druckfestigkeit für das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ wichtig. Der Quelldruck ist nur für das Dichtelement in den Schachtverschlüssen relevant.

Bei der Revision des FEP-Kataloges werden die FEPs „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ und „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ zusammengefasst.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Zusammensetzung des Verschlussmaterials (2.1.05.01) (Revision: Zusammenfassung mit „Eigenschaften von Verschlussmaterialien“ (2.1.05.02))

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)

Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)

Konvergenz (2.1.07.02)

Lösungen im Grubenbau (2.1.08.03)

Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)

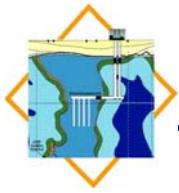
Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

5.) Wirtsgestein (2.2.02.01)

Die Randbedingung Wirtsgestein beschreibt alle geologischen und mineralogischen Eigenschaften des Salzstocks.

Die Verteilung der unterschiedlichen Salzformationen sowie die Lagerungsverhältnisse sind wesentlich für die Spannungsverteilung im Wirtsgestein.



Das FEP ist wichtig für das für das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

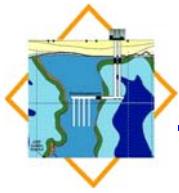
- Diapirismus (1.2.09.01)
- Subrosion (1.2.09.02)
- Permafrost (1.3.04.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Radiolyse (2.1.13.04)

6.) Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Ein erhöhter Überlagerungsdruck durch Inlandeis kann die Spannungsverhältnisse im Salzstock verändern. Aufgrund der Verhältnisse in früheren Kaltzeiten ist am Referenzstandort aber nur eine Eismächtigkeit von einigen hundert Metern zu erwarten, die nicht ausreicht, um ein erneutes Aufsteigen des Salzstocks auszulösen.

Modellrechnungen zur zukünftigen Klimaentwicklung am Referenzstandort lassen erwarten, dass die nächste Kaltzeit wahrscheinlich nur das Ausmaß der Weichsel-Kaltzeit erreichen wird. Damals wurde der Referenzstandort nicht vom Eis überfahren. Für die weitere geologische Zukunft ist aber mit einer Überfahrung durch Inlandeis zu rechnen.

Aufgrund der geringen Eismächtigkeiten und da zum Zeitpunkt der Inlandvereisung (> 100.000 Jahre) keine relevanten Hohlräume mehr im Endlagerbergwerk vorhanden sein werden, ist das beschriebene FEP für das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ nur von geringer Bedeutung.



Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderungen (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

7. Versatzkompaktion (2.1.07.04)

Durch die Spannungsänderungen und –umlagerungen im Salzgebirge wird die Konvergenz hervorgerufen, die zur Versatzkompaktion führt. Mit zunehmender Versatzkompaktion wird ein ansteigender Stützdruck aufgebaut, bis sich schließlich ein Gleichgewichtszustand einstellt und die Konvergenz zum Erliegen kommt.

Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Versatzkompaktion und Gebirgsspannungen ist das FEP für das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ von großer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Konvergenz (2.1.07.01)

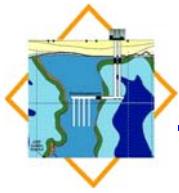
Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)



8. Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (2.1.07.05) und Quellen des Bentonits (2.1.08.08)

Während die Volumenzunahme bei der Korrosion der Endlagerbehälter sicherheits-technisch nicht relevant ist, können durch das Quellen von Verschlussmaterialien bei Lösungszutritt signifikante Volumenänderungen auftreten, die bei Einspannung der Barriere auf das Wirtsgestein einwirken. Daher werden die Rezepturen für Baumaterialien immer so bemessen, dass die Integrität des Wirtsgesteins durch den Quelldruck nicht beeinträchtigt wird. Dies trifft insbesondere auf den Bentonit zu, dessen Quelldruck durch die Auswahl des Bentonittyps und die Zumischung anderer Mineralien (z. B. Sand) begrenzt werden kann. Gleiche Anforderungen werden auch an die Betonrezepturen von Barrieren gestellt.

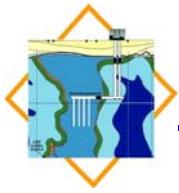
Die beiden FEPs sind daher im Bezug auf die „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ im Wirtsgestein nur von geringer Bedeutung.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

- Quellen des Bentonits (2.1.08.08)
- Metallkorrosion (2.1.09.03)
- Matrixkorrosion (2.1.09.04)
- Durchströmung von Versatz und technischen Barrieren (2.1.08.06)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Inventar: Organika (2.1.01.03)
- Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))*
- Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))*
- Konvergenz (2.1.07.01)
- Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)
- Permafrost (1.3.04.01)
- Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen (2.1.05.03)
- Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses (2.1.05.04)
- Fluiddruck (2.1.07.03)



Wärmebildung (2.1.11.01)

Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

Auflockerungszone (2.2.01.01) (Revision: „Rissbildung“ (2.1.07.06) wird eingegliedert)

Fluidvorkommen im Wirtsgestein (2.2.07.01)

9. Versagen eines Schacht- und Streckenverschlusses (2.1.07.07)

Dieses FEP ist kein wahrscheinliches FEP und wird daher im Referenzszenario nicht betrachtet.

10. Thermische Expansion und Kontraktion (2.1.11.02)

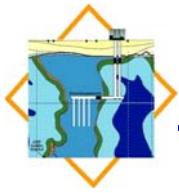
Die thermische Expansion des Gebirges infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle sowie das spätere Abklingen dieser Aufheizung und die resultierende Kontraktion des Gebirges beeinflussen die Spannungsverhältnisse im Gebirge. Entsprechende Einflüsse ergeben sich auch durch eine Abkühlung des Gebirges infolge einer Kaltzeit mit Permafrost, allerdings beschränken sich diese Einwirkungen auf den obersten Teil des Wirtsgesteins und die Schächte.

Das FEP ist für die Ausprägung des FEPs „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ wichtig. Für die Langzeitsicherheit sind aber nur die Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle relevant, da die Klimaänderungen erst zu einem Zeitpunkt auftreten, an dem die Grubenbaue des Endlagers durch die Kompaktion des Salzgrusversatzes vollständig verschlossen sind und keine Dichtheitsanforderungen mehr an die geotechnischen Barrieren bestehen.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Wärmebildung (2.1.11.01)



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Wirtsgestein (2.2.02.01)

4.16.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Als auslösende FEPs für das FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ wurden die Auffahrung der Grube, die aufgrund der Störung des Primärspannungszustandes des Gebirges das Spannungsfeld beeinflusst, sowie der Fluiddruck, der dem Gebirgsdruck entgegenwirkt, identifiziert.

Wichtige Randbedingungen für die Spannungsänderung und Spannungsumlagerungen sind die Einlagerungsgeometrie sowie die Eigenschaften von Behältern, Versatz- und Verschlussmaterial und des Wirtsgesteins. Die Behältereigenschaften und die Einlagerungsgeometrie bestimmen die abfallinduzierten thermischen Einwirkungen auf das Wirtsgestein. Entscheidend für die Ausbildung eines Stützdrucks in den Grubenräumen, der dem Gebirgsdruck entgegen wirkt, sind die Eigenschaften von Versatz- und Verschlussmaterialien. Die Mineralogie sowie Struktur und Textur im Wirtsgestein sind wichtig für die Spannungsverteilung im Salzgebirge.

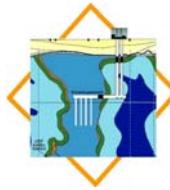
Durch die spannungsinduzierte Konvergenz wird der Versatz kompaktiert und bildet einen Stützdruck aus. Für den Stützdruck durch die Barrieren ist die Druckfestigkeit des Baumaterials entscheidend.



4.16. FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

Bei Baumaterialien für Schacht- und Streckenverschlüsse wird das Quellvermögen der Materialien durch die Verwendung entsprechender Rezepturen so begrenzt, dass der Quelldruck die Integrität des Wirtsgesteins nicht beeinträchtigt.

Die folgenden FEPs beeinflussen indirekt über den Fluiaddruck die Spannungsverhältnisse im Gebirge: die thermische Expansion und Kontraktion, der Lösungszutritt und die Lösungseigenschaften (geochemisches Milieu). Weiterhin sind die FEPs wichtig, die die Eigenschaften der Gasphase im Grubengebäude darstellen (Gasmenge, Gasvolumen sowie Gasimprägnierung).



4.16.

FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

GRS BGR DBE TEC

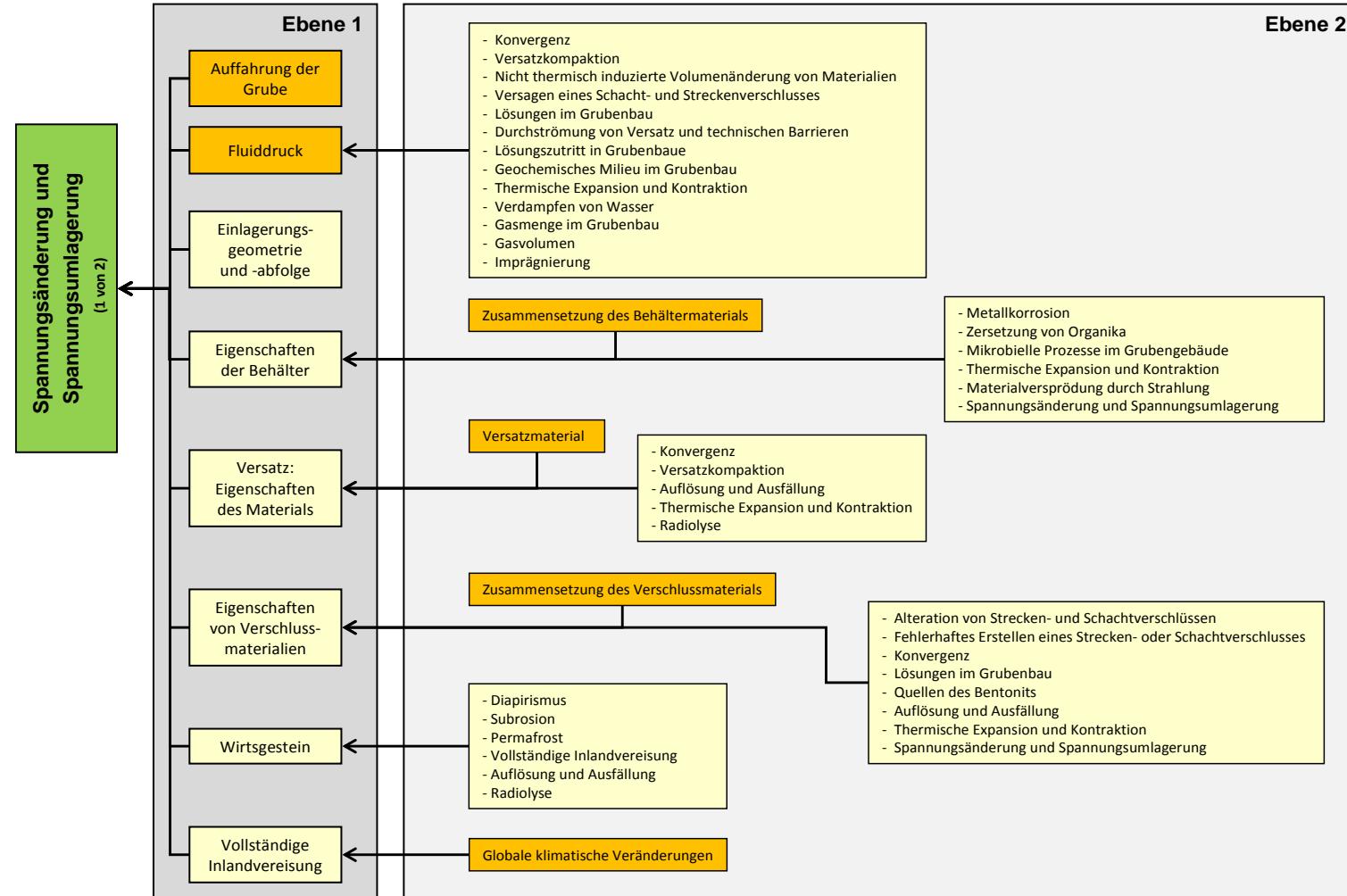


Abb. 21: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen (Teil 1) bis in die 2. Ebene.

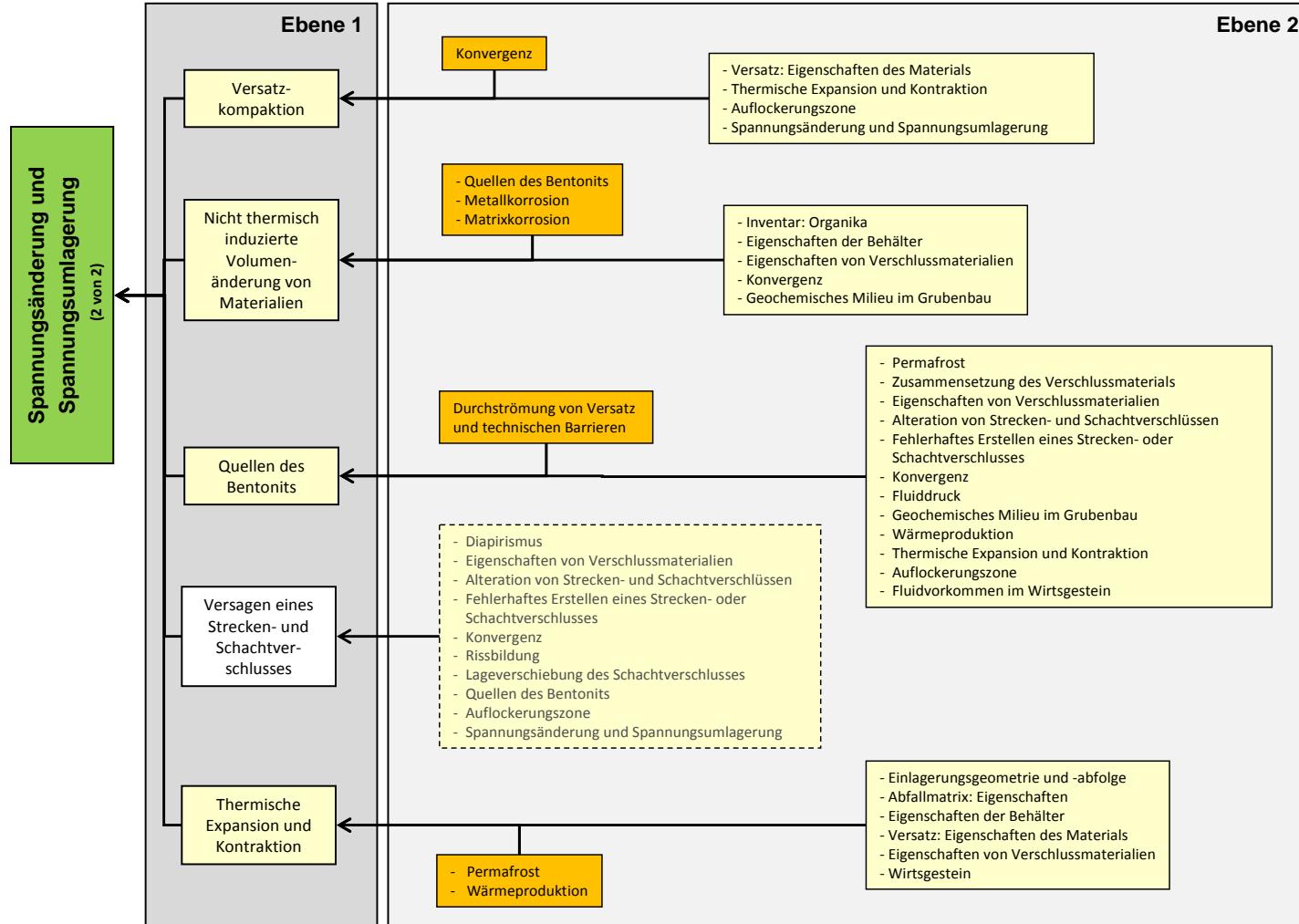
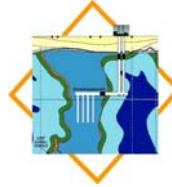
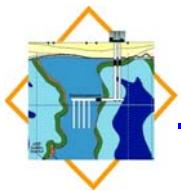


Abb. 22: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen (Teil 2) bis in die 2. Ebene.



4.17. FEP Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Das FEP umfasst die Spannungsänderungen im Wirtsgestein durch den wärmeentwickelnden Abfall und infolge der anschließenden Abkühlung aufgrund nachlassender Wärmeproduktion oder infolge Abkühlung durch klimatischen Einfluss. Das FEP wirkt sich direkt auf die Funktion des Wirtsgesteins aus.

4.17.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

In der Version 1 des FEP-Kataloges wurde neben der „Thermischen Expansion und Kontraktion“ irrtümlich auch die „Wärmeproduktion“ als direkt auslösendes FEP genannt. Dies wird bei der Revision des FEP-Kataloges korrigiert.

A.) Thermische Expansion oder Kontraktion (2.1.11.02)

Das FEP beschreibt die thermisch bedingte Volumenzunahme bzw. -abnahme eines Stoffes und wirkt sich indirekt auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren aus.

Durch die thermische Expansion bzw. Kontraktion werden Verformungen und Spannungsänderungen im Gebirge ausgelöst, die sich auch auf alle geotechnischen Barrieren im Einflussbereich auswirken. Dadurch entstehen Wechselwirkungen zwischen Gebirge, den geotechnischen Barrieren und den Behältern. Die Spannungsänderungen können Wegsamkeiten schaffen oder verschließen. Im Deckgebirge und am Salzspiegel werden während der Ausdehnung des Wirtsgesteins zughafte Entlastungen und später während der Abkühlung kompressive Verhältnisse wirksam.

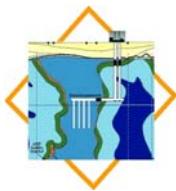
Auslösende FEPs (2. Ebene):

Permafrost (1.3.04.01)

Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)



Abfallmatrix: Eigenschaften (2.1.02.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Abfallmatrix: Zusammensetzung“ (2.1.02.01))

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Versatz: Eigenschaften des Materials (2.1.04.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Versatzmaterial“ (2.1.04.01))

Eigenschaften von Verschlussmaterialien (2.1.05.02) (Revision: Zusammenfassung mit „Zusammensetzung des Verschlussmaterials“ (2.1.05.01))

Wirtsgestein (2.2.02.01)

B.) Wärmeproduktion (2.1.11.01)

Das FEP beschreibt alle Prozesse, die bei der zeitlichen Entwicklung der Temperatur im Endlagersystem berücksichtigt werden müssen. Das FEP wirkt sich indirekt auf die Funktion der einschlussswirksamen Barrieren aus.

Der einzige relevante Prozess im Grubengebäude, der während der Nachbetriebsphase des Endlagers zu einer signifikanten Temperaturerhöhung im Salzgestein führen kann, ist der radioaktive Zerfall der Abfälle. Mit Fortschreiten des Zerfalls klingt die Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins nach wenigen tausend Jahren ab.

Das FEP ist für das FEP „Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein“ mittelbar von Bedeutung.

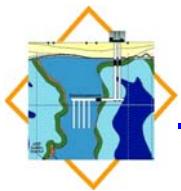
Auslösende FEPs (2. Ebene):

Radiolyse (2.1.13.03)

Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Geochemisches Milieu im Grubenbau (2.1.09.01)



4.17.2. Beeinflussende FEPs (1. Ebene)

1.) Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01)

Die Randbedingung „Einlagerungsgeometrie und -abfolge“ beschreibt die räumliche Anordnung der Einlagerungshohlräume des Endlagers und die Abfolge der Abfalleinlagerung. Das FEP wirkt sich indirekt auf die Funktion der einschlusswirksamen Barrieren aus.

Aus der Einlagerungsgeometrie und -abfolge ergibt sich die Anordnung der Wärmequellen (Abfallbehälter) und der Temperatureintrag ins Wirtsgestein. Die Aufheizung führt zur thermischen Expansion der Gesteine und beeinflusst damit das Spannungsfeld im Gebirge.

Das FEP ist für das FEP „Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein“ indirekt von Bedeutung.

Die Einlagerungsgeometrie ist eine unveränderliche und für alle Szenarien gleiche Randbedingung und entfällt daher bei der Revision des FEP-Kataloges. Die sicherheitsrelevanten Aspekte werden in anderen FEPs behandelt.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

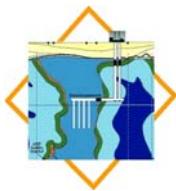
Keine identifiziert.

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

2.) Permafrost (1.3.04.01)

Das FEP beschreibt einen Zeitabschnitt einer Kaltzeit, in dem der Referenzstandort nicht von Gletschern bedeckt ist, sondern sich Permafrostboden bildet, der eine Mächtigkeit von 150 - 200 m erreichen kann. Dabei kann die Abkühlung des Gebirges bis in das Niveau der Schachtverschlüsse reichen. Das FEP hat direkte Auswirkungen auf die Funktion der Schachtverschlüsse und auf das Wirtsgestein.



Die Abkühlung durch den Permafrost betrifft nur die oberflächennahen Teile des Salzstocks und kann dort zu Spannungsänderungen führen. Auswirkungen auf die Spannungsverhältnisse im Niveau der Einlagerungssohle sind nicht zu erwarten. Da eine Kaltzeit mit Permafrost erst in ca. 50.000 Jahren zu erwarten und die Salzgruskompaktion zu diesem Zeitpunkt weit fortgeschritten ist, bestehen dann an die Funktion der Schachtverschlüsse keine Anforderungen mehr.

Das FEP ist somit für das FEP „Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein“ relevant, hat aber nur eine geringe Bedeutung für die Langzeitsicherheit.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Globale klimatische Veränderung (1.3.01.01)

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)

Oberflächengewässer (2.3.04.01)

3.) Wirtsgestein (2.2.02.01)

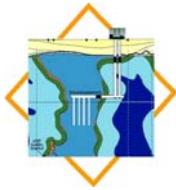
Die Randbedingung „Wirtsgestein“ beschreibt alle geologisch-mineralogischen sowie physiko-chemischen Eigenschaften des Salzstocks.

Aufgrund einer unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit sowie Duktilität der verschiedenen Salzformationen kommt es bei einem Wärmeeintrag speziell im Bereich von Schichtgrenzen zu Spannungsspitzen, die zur Rissbildung führen können. Die Verteilung der unterschiedlichen Salzformationen sowie die Lagerungsverhältnisse sind daher wesentlich für die Spannungsverteilung im Wirtsgestein.

Das FEP ist wichtig für das FEP „Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein“.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert



Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

- Diapirismus (1.2.09.01)
- Subrosion (1.2.09.02)
- Permafrost (1.3.04.01)
- Vollständige Inlandvereisung (1.3.05.02)
- Auflösung und Ausfällung (2.1.09.02)
- Radiolyse (2.1.13.04)

4.17.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

Die Wärmeproduktion im Grubengebäude wird von der Zerfallswärme der Abfälle bestimmt. Durch die aus der Aufheizung resultierende thermische Expansion des Wirtsgesteins ergeben sich Spannungsänderungen im Gebirge, die sich auch auf die geotechnischen Barrieren auswirken.

Direkt beeinflussende Randbedingungen für die thermisch bedingten Spannungsänderungen sind die Einlagerungsgeometrie, die die Anordnung der Wärmequellen (Abfallbehälter) beschreibt, sowie das Wirtsgestein, dessen Mineralogie, Struktur und Textur die Verteilung der thermisch induzierten Spannungen im Gebirge steuert.

Da die tiefreichende Abkühlung infolge von Permafrost nur die obersten Bereiche des Wirtsgesteins betrifft und zudem erst zu einem Zeitpunkt erwartet wird, an dem das Grubengebäude durch kompaktierten Salzgrus verschlossen ist und daher keine Anforderungen mehr an die Verschlussbauwerke bestehen, ist er zwar für die thermisch bedingten Spannungsänderungen im Wirtsgestein relevant, aber nur von geringer sicherheitstechnischer Bedeutung.

Über die thermische Expansion oder Kontraktion wirken noch die Eigenschaften der Behälter sowie des Versatz- und Verschlussmaterials indirekt auf die thermisch bedingten Spannungsänderungen im Wirtsgestein ein.



4.17.

FEP Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein (2.2.10.03)

GRS BGR DBE TEC

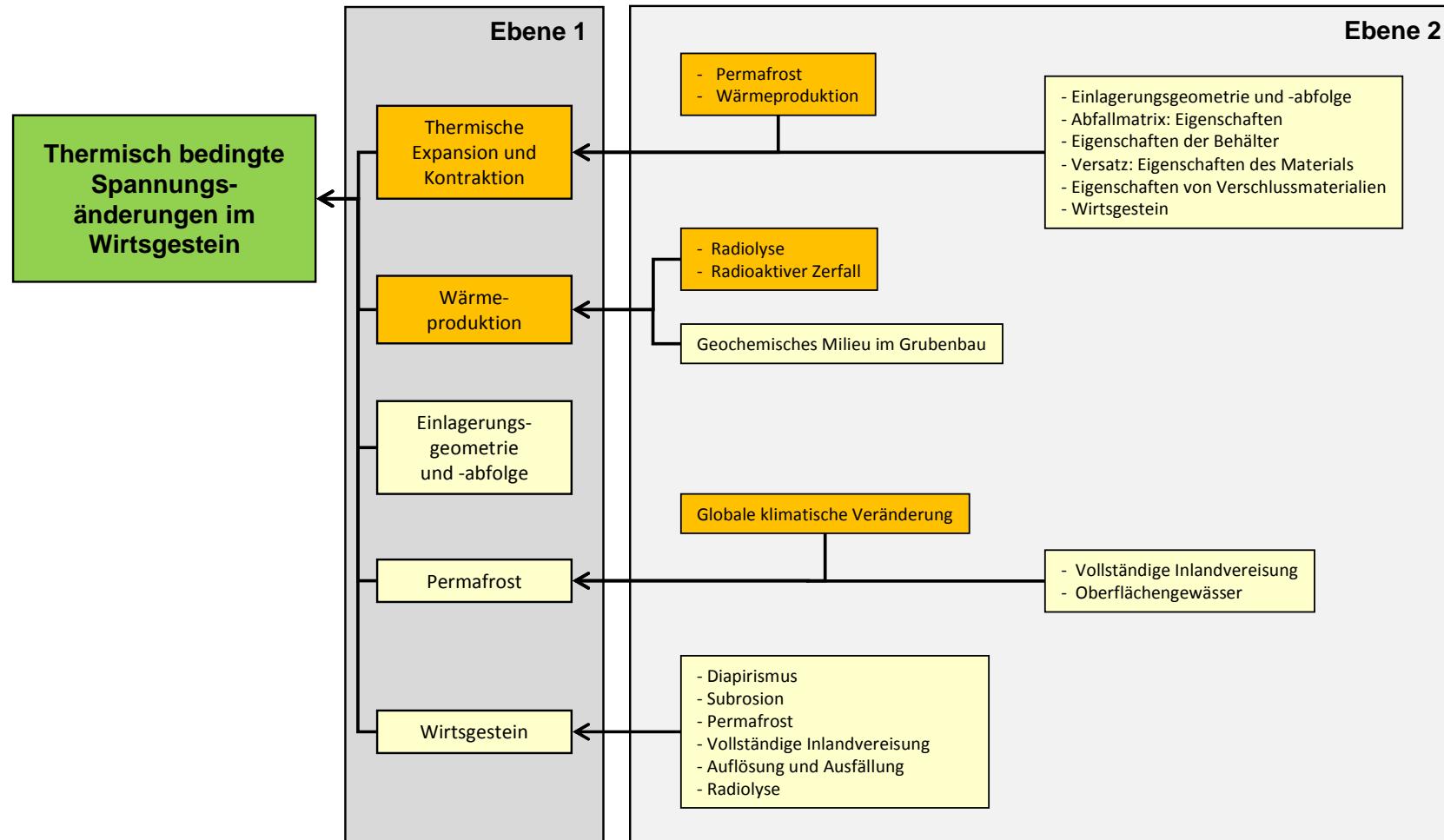
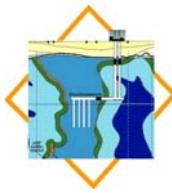


Abb. 23: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein bis in die 2. Ebene.



4.18. **FEP Feststoffgebundener Radionuklidtransport (3.2.08.01)**

Ein Transport von Radionukliden ohne Beteiligung von Fluiden wäre durch Diapirismus, Vulkanismus und eine durch Schwerkraft angetriebene Eigenbewegung der Abfallbehälter denkbar. Da der Standort so gewählt wird, dass ein Auftreten von Vulkanismus im Nachweisztraum ausgeschlossen werden kann, sind standortspezifisch nur die Eigenbewegung der Abfallbehälter und der Diapirismus zu betrachten. Das FEP wirkt direkt auf die Funktion der ewB Wirtsgestein ein und wird in den Teilsystemen Nahfeld und Wirtsgestein berücksichtigt.

4.18.1. Auslösende FEPs (1. Ebene)

A.) Absinken der Abfallbehälter (2.1.07.09)

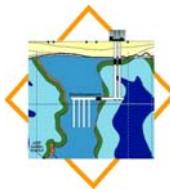
FEP mit direkten Einwirkungen auf die Funktion der ewB Wirtsgestein und Berücksichtigung in den Teilsystemen Nahfeld und Wirtsgestein.

Das Absinken der Abfallbehälter stellt einen möglichen Mechanismus dar, durch den ein Radionuklidtransport, der nicht flüssigkeitsgetragen ist und nicht über eine strömende Gasphase erfolgt, stattfinden könnte. Alle sicherheitsrelevanten Konsequenzen, die ein Absinken von Abfallbehältern haben könnte, sind bereits im FEP „Absinken der Abfallbehälter“ berücksichtigt. Das FEP „Feststoffgebundener Radionuklidtransport“ stellt insofern kein selbstständiges und in einer Kausalkette hinter dem FEP „Absinken der Abfallbehälter“ liegendes Element dar, sondern bildet lediglich einen Oberbegriff für die beiden als auslösend angegebenen FEPs „Absinken der Abfallbehälter“ und „Diapirismus“. Es gibt deshalb keine Effekte, die durch das FEP „Absinken der Abfallbehälter“ ausgelöst und nicht bereits dort berücksichtigt sind, so dass sie im FEP „Feststoffgebundener Radionuklidtransport“ berücksichtigt werden müssten.

Überlegungen zu den in der Kausalkette vor dem FEP „Absinken der Abfallbehälter“ als beeinflussend liegenden FEPs erübrigen sich, da diese Beeinflussungen ebenfalls bereits mit dem FEP „Absinken der Abfallbehälter“ vollständig berücksichtigt sind.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert.

**Beeinflussende FEPs (2. Ebene):**

Einlagerungsgeometrie und -abfolge (1.1.03.01) (Revision: entfällt)

Eigenschaften der Behälter (2.1.03.02) (Revision: Zusammengefasst mit „Zusammensetzung des Behältermaterials“ (2.1.03.01))

Konvergenz (2.1.07.01)

Wirtsgestein (2.2.02.01)

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (2.2.06.01)

B.) Diapirismus (1.2.09.01)

FEP mit der Einstufung „nicht zutreffend“ in Bezug auf die Einwirkungen auf die Funktion der ewB. Berücksichtigt in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge.

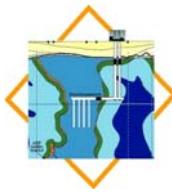
Die vorangegangenen Ausführungen zum FEP Absinken der Abfallbehälter gelten in gleicher Weise für das FEP Diapirismus: Es gibt, wenn das FEP Diapirismus auslösend ist, keine zusätzlichen Effekte, die nicht berücksichtigt wären und durch das FEP Feststoffgebundener Radionuklidtransport abgedeckt werden müssten. In ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R. et al. (2004) ist für den Aufstieg des Hauptsalzes in ca. 840 m Tiefe (ungefähre Lagetiefe der Einlagerung) für den Zeitraum Miozän bis Quartär eine Fließgeschwindigkeit von 0,07 mm/Jahr angegeben. Für den Zeitraum von einer Million Jahre resultiert daraus ein Aufstieg um 70 m. Diese Rate des Salzaufstieges ist so klein, dass eine dadurch verursachte Verlagerung von Abfällen im Referenzszenario keine Sicherheitsrelevanz hat und somit vernachlässigt werden kann.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert



4.18.2. Beeinflussende FEPs (1.Ebene)

1.) Radioaktiver Zerfall (3.1.01.01)

FEP mit indirekten Einwirkungen auf die Funktion der ewB, das in allen Teilsystemen berücksichtigt wird.

Wenn Abfallgebinde infolge Diapirismus oder durch Einsinken im kriechfähigen Salz verlagert werden, dann ist die damit einhergehende Verlagerung von Radionukliden abhängig davon, welche Radionuklide zum betrachteten Zeitpunkt in den verlagerten Abfallgebinden vorhanden sind. Durch den radioaktiven Zerfall ändert sich das Radionuklidinventar.

Auslösende FEPs (2. Ebene):

Keine identifiziert

Beeinflussende FEPs (2. Ebene):

Inventar: Radionuklide (2.1.01.01)

Gasförmige Radionuklide (3.1.04.01)

Radioaktive organische Spezies (3.1.05.01)

4.18.3. Zusammenfassende Beschreibung der Ausprägung des FEP

Feststoffgebundener Radionuklidtransport (3.2.08.01)

Zusätzlich zu den bereits mit den FEPs „Absinken der Abfallbehälter“ und „Diapirismus“ berücksichtigten sicherheitsrelevanten Prozessen ist im Referenzszenario die Veränderung des radioaktiven Inventars infolge radioaktiven Zerfalls zu berücksichtigen. Im Referenzszenario wird das FEP „Feststoffgebundener Radionuklidtransport“ nur dann sicherheitsrelevant, wenn eine Analyse ergibt, dass ein Absinken der Abfallbehälter um entsprechende Beträge auftreten kann.

Weitere Anforderungen an das Referenzszenario ergeben sich aus dem FEP nicht.

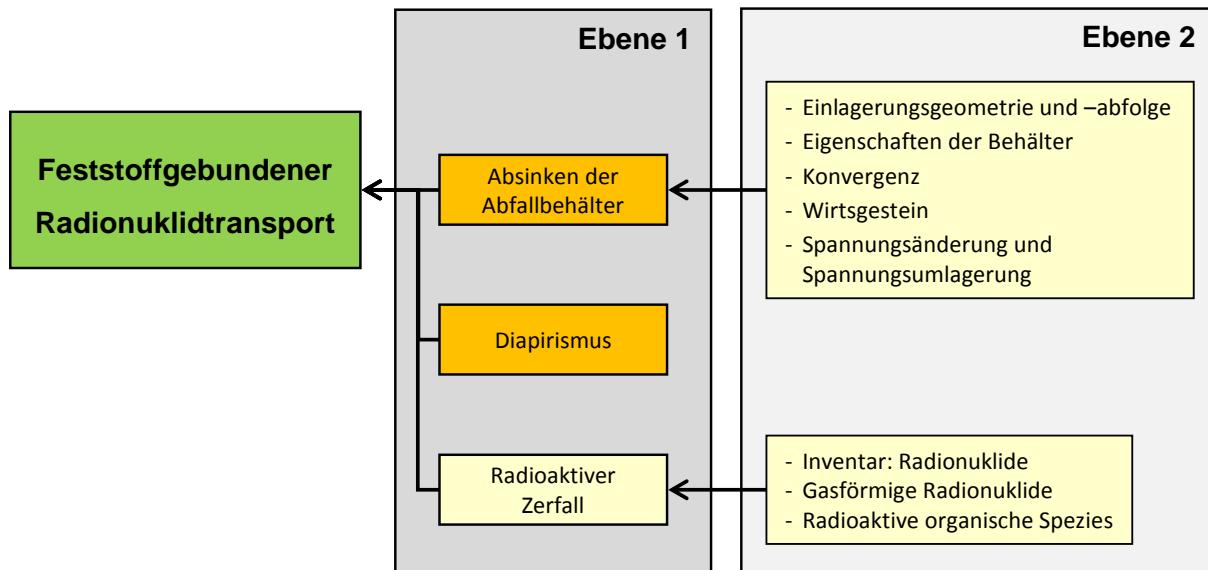
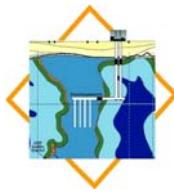


Abb. 21: Zusammenstellung der Abhängigkeiten des FEP Feststoffgebundener Radionuklidtransport bis in die 2. Ebene.



5. Beschreibung des abgeleiteten Referenzszenarios

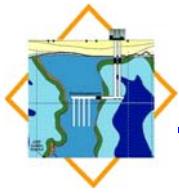
Bei der Ableitung des Referenzszenarios wird zunächst der Ausgangszustand unmittelbar nach dem vollständigen Verschluss des Endlagers charakterisiert und anschließend werden alle relevanten FEPs entsprechend der in Kapitel 4 vorgenommenen Einstufung mit ihren Auswirkungen in den Zusammenfassungen beschrieben. Die Beschreibung des Endlagersystems wird dabei entsprechend den vier Teilsystemen Nahfeld, Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge in vier Kapitel untergliedert.

Für jedes Teilsystem wird die Entwicklung vom Ausgangszustand bis in einer Million Jahre beschrieben. Dabei werden jeweils die FEPs, deren Einwirkdauer oder deren Zeitpunkt des Einsetzens der Wirkung nicht eingegrenzt werden kann, zuerst beschrieben. Anschließend werden die kurzfristig zu erwartenden FEPs beschrieben, deren Einwirkungen in den ersten 1.000 bis zu einigen 10.000 Jahren eintreten werden und die später nicht mehr vorkommen werden. Abschließend wird auf die langfristig wirkenden FEPs eingegangen, mit deren Auftreten frühestens ab ca. 50.000 bis 100.000 Jahren zu rechnen ist und die dann bis in einer Million Jahre auftreten können. Bei einigen inhaltlich eng miteinander verbundenen FEPs wurde bei der Beschreibung davon abgewichen.

5.1. Nahfeld

Als Nahfeld wird der Bereich bezeichnet, der die eingelagerten Abfälle und deren Verpackung, die Einlagerungshohlräume in der unmittelbaren Umgebung der eingelagerten Gebinde sowie die um die Einlagerungshohlräume vorhandene Auflockerungszone umfasst (BUHMANN, D., EBERTH, S. et al., 2008). Inhaltlich gehören dazu der Versatz und die Behälter- bzw. Matrixmaterialien.

Die auf das Nahfeld nach Beenden der Betriebsphase einwirkenden FEPs mit ihrer zeitlichen Wirkdauer sind in Tabelle 3 zusammengestellt.



Tab. 3: Übersicht der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden FEPs mit zeitlicher Einordnung der als sicherheitsrelevant zu betrachtenden Einwirkung am Referenzstandort.

FEP Nr.	FEP Titel	immer zu erwarten: keine zeitliche Beschränkung	kurzfristig zu erwarten: erste 1000 bis einige 10 ka	langfristig zu erwarten: ca. 50 - 100 ka bis 1000 ka
2.1.07.01	Konvergenz	X		
2.1.07.03	Fluiddruck	X		
2.1.07.09	Absinken der Abfallbehälter	X		
2.1.09.03	Metallkorrosion	X		
2.2.01.01	Auflockerungszone		X	
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	X		
3.2.08.01	Feststoffgebundener Radionuklidtransport	X		

Bereits durch die Auffahrung des Grubengebäudes kommt es zu „**Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen**“ im Gebirge, die so lange andauern, bis nach Verschluss der versetzten Grubenräume wieder ein Spannungsausgleich mit dem umgebenden Gebirge hergestellt ist. Wichtige Einflussfaktoren sind dabei das Versatz- und Verschlussmaterial sowie der Fluiddruck. Darüber hinaus kann es aber auch zu späten Zeiten durch geänderte Auflasten z. B. durch Gletscherüberfahrung oder Meeresüberflutung zu geänderten Spannungsverhältnissen im Gebirge kommen.

Weiterhin wirken sich thermische Einflüsse (Expansion, Kontraktion) auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge aus. Wichtig für das Nahfeld ist die Aufheizung des Gebirges durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle. Dabei sind vor allem die Gebindeeigenschaften und die Einlagerungsgeometrie relevant. Sobald diese Aufheizung nach mehreren 100 Jahren abklingt, kommt es zur Gebirgskontraktion und zu Spannungsänderungen. Klimatische Einflüsse (z. B. Kaltzeiten) können sich nur in den salzspiegelnahen Bereichen des Wirtsgesteins und in den Schächten auswirken und sind daher für das Nahfeld nicht relevant.

Die Spannungsumlagerungen wirken sich direkt auf die Funktion der geologischen Barriere aus.



Die Spannungsumlagerungen führen an der Hohlraumkontur zu Gebirgsverformungen („**Konvergenz**“). Sobald das konvergierende Gebirge auf den Salzgrus-Versatz aufläuft, wird dieser kompaktiert, wobei der Fluideindruck in den Poren der Kompaktion entgegenwirkt. Es baut sich ein Stützdruck auf, der das Fortschreiten der Konvergenz hemmt. Sobald der Stützdruck den lithostatischen Druck erreicht, kommt die Konvergenz zum Erliegen. In welchem Umfang die Porosität und Permeabilität des Versatzes im Zuge der konvergenzbedingten Kompaktion reduziert werden, hängt davon ab, ob die im Porenraum eingeschlossenen Fluide abfließen können. Es besteht somit eine enge Wechselwirkung zwischen den Spannungsverhältnissen im Gebirge, der Konvergenz, dem Fluideindruck und dem Stützdruck durch Versatz und geotechnische Barrieren.

Geänderte Spannungsverhältnisse im Gebirge durch Gletscherüberfahrung oder Meeresüberflutung können - falls zum entsprechenden Zeitpunkt noch Resthohlräume im Grubengebäude vorhanden sind - zu einer leichten Erhöhung der Konvergenz führen, die auch im Nahfeld wirksam wird.

Wie im vorangehenden Abschnitt angeführt, hat auch der „**Fluideindruck**“ Auswirkungen im Nahfeld. Solange die Konvergenz der Hohl- und Porenräume anhält, wird der Fluideindruck erhöht. Der Fluideindruck wirkt der Konvergenz entgegen und verlangsamt sie. Dabei kommt es, insbesondere bei erhöhtem Fluideindruck, auch zu einer Verlangsamung der Kompaktion des Versatzes und der Schädigungs- und Dilatanzrückbildungssprozesse.

Im Nahfeld sind nur geringe Feuchtemengen und keine größeren Lösungsvorkommen zu erwarten. Auch ein Zusickern relevanter Lösungsmengen zu den Einlagerungsbereichen ist bei intakten Verschlussbauwerken nicht zu erwarten. Der Fluideindruck entspricht dann dem Gasdruck der eingeschlossenen Luft, er wird gegebenenfalls durch zuströmende oder gebildete Gase erhöht. Die auslösenden Prozesse, die zu einer Gasbildung führen, sind wiederum abhängig vom Lösungsangebot, so dass aufgrund der sehr geringen Lösungsmengen auch die Gasbildung gering ist. Fluideindrücke oberhalb des lithostatischen Druckes sind daher nicht zu erwarten.

Das „**Absinken der Abfallbehälter**“ im fließfähigen Salz aufgrund der höheren Wichte der Gebinde ist ein kontinuierlicher Prozess, der zu einem feststoffgebundenen Radionuklidtransport führt. Aufgrund der erhöhten Plastizität von Salz bei Erwärmung ist davon auszugehen, dass das Absinken der Abfallbehälter während der Phase starker Wärmeentwicklung beschleunigt abläuft. Trotzdem ist davon auszugehen, dass die maximal zu

5.1. Nahfeld

erwartende Absinktiefen der Gebinde im Vergleich zur Hauptsalzmächtigkeit unterhalb der Einlagerbereiche irrelevant ist. Daher ist auch die sicherheitstechnische Relevanz des Absinkens der Abfallbehälter für das Referenzszenario gering.

Aus dem zuvor beschriebenen Absinken der Abfallbehälter resultiert das FEP „**Feststoffgebundener Radionuklidtransport**“. Es fasst Prozesse zusammen, bei denen Radionuklide von ihrer Einlagerungsposition ohne Beteiligung von Fluiden wegbewegt werden.

Als feststoffgebundene Transportmechanismen für Radionuklide kommen für den Referenzstandort nur die schwerkraftbedingte Eigenbewegung der Abfallbehälter und der Diapirismus in Frage. Wie bereits im Abschnitt Absinken der Abfallbehälter dargelegt, ist dabei nur mit geringen Bewegungen zu rechnen, so dass auch der Radionuklidtransport entsprechend gering ausfallen wird. Für den Transport im Rahmen des Diapirismus ist im Hauptsalz eine durchschnittliche Aufstiegsrate von 0,07 mm/Jahr (70 m im Nachweiszeitraum von einer Million Jahre) (ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R. et al. 2004) anzusetzen. Eine dadurch bedingte Höherlegung des Einlagerungsbereiches ist gering und ergibt für die Umgebung der eingelagerten Gebinde keine neuen integritätsrelevanten Einschränkungen.

Schließlich ist im Nahfeld auch die „**Metallkorrosion**“ zu betrachten. Unedle Metalle, insbesondere Eisen und Aluminium, sind im Behältermaterial bzw. in einigen Abfallkomponenten enthalten. Da der Sauerstoff im Endlager schnell verbraucht ist, spielt die anaerobe Korrosion eine wesentlich bedeutendere Rolle als die aerobe Korrosion. Im Referenzszenario sind, wie bereits beschrieben, die verfügbaren Feuchtemengen begrenzt. Die Feuchte in den eingelagerten Endlagergebinden ist vernachlässigbar, die von unterirdisch auf Halde gelagerten Hauptsalz der Staßfurtserie wird etwa 2% betragen, die Gebirgsfeuchte liegt mit 0,02% zwei Größenordnungen darunter. Da kein Fremdmaterial als Versatzmaterial eingesetzt wird, ist für das Referenzszenario die von außen angreifende Feuchte als NaCl-Lösung anzunehmen und als Temperaturmaximum sind 200°C anzusetzen.

Für solche Bedingungen betragen die flächenhaften Korrosionsraten für die betrachteten Behältermaterialien zwischen 2 µm/a (Edelstahl, CSD) und 15 µm/a (Feinkornbaustahl, BSK). Die Korrosion kommt zum Erliegen, wenn das verfügbare Wasser verbraucht ist. Die Eindringtiefe beträgt dann weniger als 0,5 mm. Für POLLUX-Behälter sind höhere Eindringtiefen anzusetzen, aufgrund der hohen Wandstärke spielt für diese Gebinde die Metallkorrosion im Referenzszenario aber ebenfalls keine Rolle.



Ein Behälterversagen alleine durch flächenhafte Korrosion kann für das Referenzszenario ausgeschlossen werden. Lokale Korrosionseffekte müssen hingegen berücksichtigt werden, da sie eventuell auch bei geringen Feuchtemengen zu einer vollständigen Durchdringung der Wandstärke einiger Behälter führen können.

Als kurzfristig wirkend im Zeitraum von den ersten 1.000 bis 10.000 Jahren ist die „**Auflockerungszone**“ eingestuft. Durch die geänderten Spannungsverhältnisse im Gebirge nach der Auffahrung der Grubenräume kann sich das Salz über das reine Kriechen hinaus deformieren und an der Kontur durch Rissbildung eine wenige Dezimeter mächtige Auflockerungszone ausbilden. Als potenzieller Fließweg ist die Auflockerungszone von großer sicherheitstechnischer Bedeutung.

Eine hydraulisch wirksame Auflockerungszone wird nur in der frühen Nachbetriebsphase erwartet, da sich durch die Wechselwirkung zwischen dem durch Salzgrus-Kompaktion gebildeten Stützdruck und der Konvergenz die Risse in der Auflockerungszone verschließen und auch verheilen können. Diese Prozesse werden durch die thermische Expansion der Gesteine infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle beschleunigt. Das Verschließen der Risse wird durch das viskoplastische Materialverhalten des Salzes begünstigt. Voraussetzung ist, dass Fluide, die in den Restrisen eingeschlossen sind, entweichen können. Eine Verheilung der Risse ist durch Kristallbildung unter Anwesenheit von Feuchte möglich.

Bei Abklingen der Aufheizung durch die wärmeentwickelnden Abfälle kommt es durch Gesteinskontraktion zu Zugspannungen, durch die möglicherweise auch zeitweise Risse in der Auflockerungszone wieder aufreißen können.



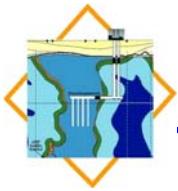
5.2. Strecken und Schächte

Das Teilsystem Strecken und Schächte beinhaltet die Strecken und sonstigen bergmännischen Hohlräume außerhalb der Einlagerungshohlräume (Nahfeld) und die Schächte mitsamt den dazugehörigen Auflockerungszonen (BUHMANN, D., EBERTH, S. et al. 2008).

Die in den Strecken und Schächten nach Beenden der Betriebsphase einwirkenden FEPs mit ihrer zeitlichen Wirkdauer sind nachfolgend in Tabelle 4 aufgelistet.

Tab. 4: Übersicht der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden FEPs mit zeitlicher Einordnung der als sicherheitsrelevant zu betrachtenden Einwirkung am Referenzstandort

FEP Nr.	FEP Titel	immer zu erwarten: keine zeitliche Beschränkung	kurzfristig zu erwarten: erste 1000 bis einige 10 ka	langfristig zu erwarten: ca. 50 - 100 ka bis 1000 ka
1.2.07.01	Erosion	X		
1.3.04.01	Permafrost			X
1.3.05.02	Vollständige Inlandvereisung			X
2.1.05.02	Eigenschaften von Verschlussmaterialien		X	
2.1.05.03	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	X		
2.1.07.01	Konvergenz	X		
2.1.07.03	Fluiddruck	X		
2.1.07.06	Rissbildung	X		
2.1.08.08	Quellen des Bentonits		X	
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	X		
2.1.09.03	Metallkorrosion	X		
2.2.01.01	Auflockerungszone		X	
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	X		



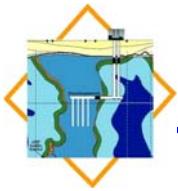
Wie schon in Kapitel 5.1 für das Nahfeld beschrieben, findet in den Grubenräumen so lange „**Konvergenz**“ statt, bis sie durch den sich aufbauenden Stützdruck zum Erliegen kommt. Auch die Ausprägung sowie die auslösenden und beeinflussenden Faktoren sind in diesem Teilsystem weitestgehend die Gleichen wie im Nahfeld. Deshalb werden nur die Prozesse genau erläutert, die im Teilsystem Strecken und Schächte unterschiedlich wirken oder nur dort auftreten.

Für die Entwicklung des Teilsystems sind auch die durch Konvergenz angetriebene Salzgrus-Kompaktion und der sich dabei aufbauende Stützdruck wichtig. Durch diesen Stützdruck kommt es zu Rissrückbildung- und im Weiteren zu Rissverheilungsprozessen in der Auflockerungszone versetzter Strecken, um Bohrlöcher oder um den Schacht. Auch der Einfluss des Fluiddrucks ist in gleicher Weise wie im Nahfeld zu bewerten. All diese Vorgänge wirken in den Strecken und Schächten bis zum Erreichen eines Druckgleichgewichts womit die Versatzkompaktion abgeschlossen wird.

Die Aufheizung während der frühen Nachbetriebsphase (500 – 1.000 Jahre) durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle wirkt am stärksten auf die Einlagerungsbereiche und die angrenzenden Grubenbaue. Mit zunehmender Entfernung von den Einlagerungsbereichen wird dieser Einfluss schwächer, so dass auch die thermische Expansion des Gebirges schwächer wird und die Konvergenz entsprechend weniger stark beeinflusst. Gleches gilt für die Kontraktionsprozesse, die nach dem Abklingen der Erwärmung auftreten.

Die leichte Erhöhung der Konvergenz der Resthohlräume des Grubengebäudes durch die Auflast der Wassersäule bei einer Überflutung durch das Meer wirkt sich in geringem Umfang auch auf die Strecken und Schächte aus.

Zusätzlich zu diesen Einflüssen wirkt in den oberflächennahen Bereichen des Teilsystems, also in den Schächten, eine durch Kaltzeiten hervorgerufene Gesteinskontraktion. Diese Einwirkung tritt auf, wenn eine tiefgreifende Abkühlung mit der Bildung von Permafrost entsteht. Die daraus resultierende mögliche Beeinträchtigung der Schachtverschlüsse durch Kontraktionsrisse hat jedoch keinerlei sicherheitstechnische Bedeutung, da sie zu einem so späten Zeitpunkt auftreten wird (ab ca. 50.000 Jahre), dass keine Anforderungen mehr an die Funktion der Schachtverschlüsse bestehen. Damit verbundene Aspekte werden nachfolgend bei den Klimaentwicklungen „Permafrost“ und „Vollständige Inlandvereisung“ genauer betrachtet.



Wie bei der Konvergenz ist die Ausprägung des FEP „**Fluiddruck**“ im Teilsystem Strecken und Schächte, insbesondere die gegenseitige Beeinflussung von Konvergenz, Fluiddruck und Stützwirkung des Versatzes, weitgehend identisch mit der im Nahfeld beschriebenen. Eine etwas andere Situation findet sich im Bereich des Grubengebäudes nahe am Schachtverschluss, der im Laufe des Nachweiszeitraumes lösungserfüllt sein wird. Dort wird der Fluiddruck zu späteren Zeitpunkten hauptsächlich über die wässrige Phase bestimmt.

Das FEP „**Auflösung und Ausfällung**“ betrifft im betrachteten Teilsystem die versetzten Strecken und Schächte sowie die Verschlussbauwerke. Auch bei den geringen Lösungsmengen, die im Referenzszenario auftreten, sind Auflösungsprozesse möglich, jedoch stellt sich aufgrund der großen Versatzmenge dann schnell ein chemisches Gleichgewicht ein.

Bei den Verschlussbauwerken ist im Referenzszenario für lange Zeiträume eine Erhöhung der Durchlässigkeit nicht auszuschließen, die unter anderem auf die Auflösungsprozesse zurückzuführen ist. Diese eventuelle Erhöhung würde aber erst nach der bestimmungsgemäßen Lebensdauer der Verschlussbauwerke relevant und hat somit keinen Einfluss auf die Sicherheitsbewertung des Endlagers. Sie ist aber bei der Bewertung des Referenzszenarios zu berücksichtigen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass einige Bereiche in diesem Teilsystem durch Ausfällungen wieder undurchlässiger werden.

Bentonit ist als Baumaterial für die Dichtelemente der Schachtverschlüsse vorgesehen. Diese Dichtelemente stehen in Kontakt mit dem Grundwasser des Deckgebirges. Das „**Quellen des Bentonits**“ bei Wasserzutritt ist wichtig für die Funktionalität der Barriere. Der Bentonit-Typ wird so ausgewählt, dass seine chemo-physikalischen Eigenschaften mit dem erwarteten Chemismus der Wässer kompatibel sind. Der Quelldruck bewirkt eine Einspannung des Dichtelementes sowie einen Druckaufbau in der Kontaktfuge zwischen Dichtelement und Gebirge. Er hat somit einen auf die Hohlraumkontur wirkenden Stützdruck zur Folge. Dieser Prozess ist für die Funktionalität der Dichtelemente entscheidend und wird daher in der frühen Nachbetriebsphase gezielt herbeigeführt.

Die Konvergenz wirkt dem Quellvorgang entgegen und sorgt für die gebirgsmechanische Einspannung der Elemente der Schachtverschlüsse. Technisch wird der Quelldruck mit Hilfe der Bentonitrezeptur so eingestellt, dass er unterhalb des Fracdrucks des Gebirges bleibt.

Der Zutritt von Grundwässern mit variierendem Chemismus, etwa aufgrund geänderter hydrogeologischer Verhältnisse infolge einer Kaltzeit, kann die Funktionalität der Dichtelemente



beeinträchtigen, da das Quellvermögen und die Sorptionskapazität des Bentonits mit zunehmender Salinität des Grundwassers abnehmen. Beeinträchtigungen der Baumaterialien der Schachtverschlüsse durch Spannungsänderungen oder Grundwässer mit anderem Chemismus während einer Kaltzeit sind jedoch nicht relevant für die Langzeitsicherheit, da derartige Klimaentwicklungen erst nach Ablauf der erforderlichen Barrierenstandzeiten auftreten werden.

Wie für das Teilsystem Nahfeld dargestellt, wirken sich auch in den Strecken und Schächten „Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen“ im Gebirge aus.

Der Wärmeeintrag aus dem radioaktiven Zerfall der Abfälle führt zur thermischen Expansion des Gesteins. Hieraus resultieren Gebirgsspannungen, die die konvergenzbedingten Verformungen der Grubenräume beschleunigen. Mit zunehmender Entfernung von den Einlagerungsbereichen nimmt die Intensität der thermisch induzierten Spannungen ab und tritt entsprechend der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Temperaturfeldes zeitlich versetzt auf.

Die Spannungsumlagerungen kommen zum Stillstand sobald ein Druckgleichgewicht zwischen dem Gebirge und der Hohlraumverfüllung hergestellt ist.

Im Teilsystem Strecken und Schächte ist das FEP „**Metallkorrosion**“ auch im Hinblick auf die ablaufenden Prozesse ebenso zu betrachten wie im Nahfeld. Im Wesentlichen bestehen die gleichen Abhängigkeiten von der Materialzusammensetzung und dem chemischen Milieu wie bei den zuvor diskutierten FEPs. Allerdings sind die Metallmengen, die in diesem Teilsystem vorkommen können, geringer. Durch Restluft und Restfeuchte setzt unmittelbar nach Einbringung unter oxidierenden Bedingungen eine Korrosion der nach dem Bergwerksbetrieb in den Strecken verbliebenen Metalle ein. Der Sauerstoff der Restluft wird dabei insbesondere durch die Bildung von Eisenoxiden aufgezehrt. Nach dem Verbrauch des Sauerstoffs in der Restluft laufen unter Bildung von Wasserstoffgas anaerobe Korrosionsprozesse ab.

Mit kurzfristig zu erwartender Einwirkung ist die „**Auflockerungszone**“ als potenzieller Fließpfad von großer sicherheitstechnischer Bedeutung. Sie wird allerdings vor der Errichtung von Strecken- und Schachtverschlüssen in diesen Bereichen so weit wie möglich entfernt. Ferner kann durch technische Maßnahmen (Injektionen) sichergestellt werden, dass



sich keine relevanten Umläufigkeiten bilden. Wie bereits beschrieben, führen die Konvergenz und der Stützdruck des Versatzes bzw. der Barrieren dazu, dass sich die Risse der Auflockerungszone wieder verschließen und langfristig verheilen. Je nach Schädigungsgrad, Spannungsentwicklung und Größe der Auflockerungszone ist von einem Zeitraum von einigen hundert oder mehreren tausend Jahren auszugehen, in dem die Risse nach Verfüllung des Hohlraums hydraulisch wirksam sind.

Neben der oben beschriebenen Auflockerungszone kann es durch mechanische oder thermische Einwirkungen auch zur „**Rissbildung**“ im Gebirge und in den Barrieren kommen. Auslösend sind hierfür Spannungsänderungen durch Kriechvorgänge, Fluiddrücke, geänderte Gebirgsauflasten sowie in der Folge von Temperaturänderungen durch die eingelagerten Abfälle bzw. durch Klimaänderungen.

Die „**Eigenschaften von Verschlussmaterialien**“ sind in erster Linie für den Auslegungszeitraum der Barrieren relevant, der mehrere 1.000 Jahre umfassen kann. In diesem Zeitraum müssen die chemo-physikalischen Eigenschaften der Materialien die anforderungsgerechte Funktion der Barrieren, insbesondere bezüglich der Dichtigkeit und der Langzeitstabilität, sicherstellen.

Die Funktion der Strecken- und Schachtverschlüsse besteht darin, einen Zu- oder Abstrom von Fluiden zum oder vom Endlager solange zu verhindern bis der Salzgrusversatz soweit kompaktiert ist, dass er eine ähnlich geringe hydraulische Leitfähigkeit wie das umgebende Salzgebirge aufweist.

Nach Überschreiten des Auslegungszeitraumes ist auch für das Referenzszenario ein Versagen eines Schachtverschlusses und ein Lösungszutritt nicht auszuschließen. Falls diese Lösungen bis zu einem Streckenverschluss vordringen, kann es zur partiellen Auflösung des Baumaterials bzw. zur Ausfällung gelöster Stoffinventare im Porenraum kommen. Da der Versatz zu diesem Zeitpunkt keine signifikante hydraulische Leitfähigkeit mehr aufweist, hat diese späte Beeinflussung von Verschlussmaterialien aber keine Bedeutung mehr für den Langzeitsicherheitsnachweis. Daher wurde die Einwirkungsdauer des ansonsten ohne zeitliche Einschränkung wirkenden FEP für dieses Teilsystem als kurzfristig eingestuft.



Veränderungen der Eigenschaften der Verschlussmaterialien aufgrund geochemischer Milieuveränderungen verursachen die „**Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen**“. Die Strecken- und Schachtverschlüsse werden entsprechend der prognostizierten zukünftigen Standortentwicklung ausgelegt. Weicht die tatsächliche Entwicklung von der Prognose ab (dies wird zu späten Zeiten immer wahrscheinlicher), so kann es zur Alteration der Barrieren kommen. Dadurch kann das Vordringen von Lösungen zu den Abfällen sowie die Ausbreitung von Radionukliden beeinflusst und beschleunigt werden. Da die Schachtverschlüsse mit Grundwasser aus den oberen Deckgebirgsschichten in Kontakt kommen, ist bei diesen Verschlüssen die Wahrscheinlichkeit für eine Alteration hoch. Diese kann einerseits die Auflösung von Baustoffen andererseits auch die Ausfällung von gelösten Stoffen im Porenraum umfassen. Demgegenüber kann eine Alteration der Strecken- und Schachtverschlüsse durch Lösungszutritte aus dem Wirtsgestein oder zu späten Zeiten nach Versagen der Schachtverschlüsse und Lösungszutritt aus dem Deckgebirge zum Grubengebäude eintreten. Ein mögliches Versagen der Barrieren zu späten Zeiten ist sicherheitstechnisch nicht mehr relevant, da der kompaktierte Salzgrus dann nur noch eine geringe hydraulische Leitfähigkeit hat und ein erheblicher Teil der kurzlebigen Radionuklide dann bereits zerfallen ist. Die sicherheitstechnische Relevanz der „**Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen**“ ist daher nur während des Auslegungszeitraums der Barrieren gegeben und durch technische Vorsorgemaßnahmen bei der Planung und Errichtung weitgehend ausgeschlossen.

Das FEP „**Erosion**“ wirkt ohne zeitliche Beschränkung als Salzstock externes Phänomen auf das Teilsystem Strecken und Schächte ein und beschreibt Vorgänge, die zur Abtragung der Erdoberfläche beitragen.

Erosionsraten sind im Wesentlichen abhängig von der Topographie und Vegetation eines Gebietes, vom herrschenden Klima sowie von der Art und Zusammensetzung der Gesteine. Im norddeutschen Umfeld wurden in einer tektonisch aktiveren Phase in der Zeitspanne vom Oberen Miozän bis Altquartär (ca. 10 Millionen Jahre) nur 100 m bis 200 m Gesteinsmächtigkeit erodiert (KÄBEL 2001), was einer Erosionsrate von 10 m bis 20 m innerhalb einer Million Jahre entspricht. Der Referenzstandort liegt in einem Gebiet mit geringem Relief und Absenkungstendenz, so dass die Erosion im Nachweiszeitraum geringer als im genannten Vergleichszeitraum ausgeprägt sein wird. Betroffen wären demnach nur die oberen Schachtbereiche.

Änderungen dieser Verhältnisse sind am Referenzstandort anzunehmen, wenn in einer Kaltzeit eine Eisüberdeckung vorliegt. Diese Vorgänge werden im folgenden Abschnitt „**Vollständige Inlandvereisung**“ behandelt.



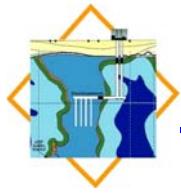
Im diskutierten Teilsystem sind die Strecken- und Schachtverschlüsse durch das FEP „**Vollständige Inlandvereisung**“ direkt betroffen. Die Ausprägung hängt ab von der Intensität und Dauer einer neuen Kaltzeit und somit vom Ausmaß einer globalen klimatischen Änderung.

Bei zukünftigen Kaltzeiten ist zu erwarten, dass Teile der Erdoberfläche durch einen mächtigen Inlandeisgletscher bedeckt sein werden. Während vergangener Kaltzeiten in den letzten ca. 500.000 Jahren wurde der Referenzstandort mehrfach mit Eis überdeckt, das maximale Mächtigkeiten von ca. 500 - 700 m erreichte.

In Zukunft ist am Referenzstandort mit einer Entwicklung zu rechnen, bei der es zu einer vollständigen Eisüberdeckung kommt, an deren Basis der Permafrost zurückgebildet sein wird. Durch die Eisüberfahrung werden oberflächennahe Schichten erodiert (Exaration) und/oder eistektonisch gestört. Beide Möglichkeiten führen zu einer Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit, wobei sich die geänderten Fließrichtungen oder Geschwindigkeiten des Grundwassers nicht genau prognostizieren lassen. Der Tiefgang von Lagerungsstörungen, die durch das vorrückende Inlandeis verursacht wurden, erreichte während der vergangenen Kaltzeiten im Gebiet des Referenzstandortes ca. 100 bis 150 m. Durch diese Vorgänge kann auch eine Beeinflussung der Schachtbauwerke im obersten Bereich nicht ausgeschlossen werden. Einwirkungen auf die Strecken in der Nähe der Einlagerungsbereiche werden dagegen nicht auftreten.

Auch die Ausprägung des FEP „**Permafrost**“ wird durch die Intensität und Dauer einer neuen Kaltzeit bestimmt, wodurch mit einem kontinuierlichen Permafrost erst ab ca. 70.000 Jahren nach heute gerechnet wird.

Permafrostboden entsteht, wenn die Jahresmitteltemperaturen weniger als -2°C betragen und der Inlandeisgletscher den Standort nicht überdeckt. Am Referenzstandort wird sich mit dem Einsetzen einer neuen Kaltzeit in ihrem weiteren Verlauf bis zum Hochglazial ein sporadischer, diskontinuierlicher und letztlich ein kontinuierlicher Permafrost entwickeln. In den vergangenen kaltzeitlichen Verhältnissen am Referenzstandort wurden Permafrostmächtigkeiten von ca. 150 m bis 200 m erreicht. Davon würden nur die oberflächennahen Anteile der Schächte betroffen sein. Außerdem könnte mehrfaches Gefrieren und Tauen das Material der oberen Teile der verfüllten Schächte beanspruchen, was zu Undichtigkeiten und letztlich zum Versagen der oberen Schachtabdichtungen und -verfüllungen führt. Mit einer Abkühlung der tiefer liegenden Schachtteile ist nur in geringem Maße zu rechnen, da der Salzspiegel unterhalb der maximalen Mächtigkeit des Permafrost liegt. So sind auch anders als bei nahe



5.2. Strecken und Schächte

der Oberfläche liegenden Salzstöcken keine kryogenen Risse zu erwarten. Am Referenzstandort wurden diese auch trotz intensiver Erkundungstätigkeit bislang nicht nachgewiesen.

Die Verbreitung eines kontinuierlichen Permafrostes beeinflusst ebenfalls die hydraulischen und geochemischen Grundwasserverhältnisse am Referenzstandort. Allerdings tritt ein Versagen der Abdichtungen unter derart veränderten Randbedingungen nur im oberen Teil der Schächte auf und zudem so spät, dass diese Vorgänge nicht mehr sicherheitsrelevant sind.



5.3. Wirtsgestein

Als Wirtsgestein wird am Referenzstandort der gesamte Salzstock mit allen darin vorkommenden Salinargesteinen verstanden.

Die auf das Wirtsgestein im Betrachtungszeitraum einwirkenden FEPs mit ihrer Wirkdauer sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tab. 5: Übersicht der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden FEPs mit zeitlicher Einordnung der als sicherheitsrelevant zu betrachtenden Einwirkung am Referenzstandort

FEP Nr.	FEP Titel	immer zu erwarten: keine zeitliche Beschränkung	kurzfristig zu erwarten: erste 1000 bis einige 10 ka	langfristig zu erwarten : ca. 50 - 100 ka bis 1000 ka
1.2.09.02	Subrosion			X
1.3.04.01	Permafrost			X
1.3.05.02	Vollständige Inlandvereisung			X
2.1.07.01	Konvergenz	X		
2.1.07.03	Fluiddruck	X		
2.1.07.06	Rissbildung		X	
2.1.07.09	Absinken der Abfallbehälter	X		
2.1.08.08	Quellen des Bentonits		X	
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	X		
2.1.12.06	Imprägnierung		X	
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	X		
2.2.10.03	Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	X		
3.2.08.01	Feststoffgebundener Radionuklidtransport	X		

Aus den **Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen** im Wirtsgestein resultiert die „**Konvergenz**“ sowie bei dilatanten Verformungen die Auflockerungszone an der Kontur der Grubenräume. Durch Wechselwirkungen zwischen der Konvergenz und dem Stützdruck



der verfüllten Strecken kann ein Verschließen und Verheilen der Auflockerungszone resultieren. Die entsprechenden Prozesse wurden in den Teilsystemen „Nahfeld“ und „Strecken und Schächte“ beschrieben.

Die Erwärmung des Gebirges durch die Zerfallswärme der radioaktiven Abfälle in der frühen Nachbetriebsphase führt zur thermisch initiierten Expansion und – später nach Abklingen der Aufheizung – zur Kontraktion des Salzgestein. Hieraus resultieren „**Thermisch bedingte Spannungsänderungen**“ im Wirtsgestein. Wie in den Beschreibungen für die anderen Teilsysteme erläutert, können sie, sobald die Dilatanzgrenze des Salzes überschritten ist, zu Rissbildungen im Wirtsgestein und in den geotechnischen Barrieren führen. Andererseits können sich vorhandene Risse durch die Gesteinsexpansion schließen. Mit zunehmendem Abstand von den Einlagerungsbereichen ergibt sich eine zeitliche Verzögerung des Auftretens und eine Verringerung der Intensität der thermisch bedingten Spannungsänderungen.

Durch Kaltzeiten bedingte Gesteinskontraktionen wirken sich nur in den obersten Bereichen des Salzstocks aus. Eine weitere Entwicklung am Standort, die sich auf die Spannungsbedingungen im Wirtsgestein auswirken kann, ist eine Überflutung durch das Meer, die z. B. Folge einer globalen Klimaerwärmung sein könnte. Dabei erfährt das Gebirge durch die als Auflast wirkende Wassersäule eine Druckerhöhung. Aus den Spannungsänderungen könnte eine leicht erhöhte Konvergenz in Resthohlräumen des Grubengebäudes resultieren.

Wie in den vorherigen Teilsystemen ist das FEP „**Fluiddruck**“ auch im Wirtsgestein zu berücksichtigen. Die Ausprägungen des Fluiddrucks wurden bereits in den Teilsystemen „Nahfeld“ (Kapitel 5.1) sowie „Strecken und Schächte“ (Kapitel 5.2) beschrieben und gelten ebenso für die aufgelockerten Bereichen des Wirtsgesteins.

Der in den Dichtelementen der Schachtverschlüsse verwendete Bentonit entwickelt bei der Aufsättigung mit Wasser einen Quelldruck, der sich auf das Wirtsgestein auswirkt. Technisch wird der Quelldruck mit Hilfe der Bentonitrezeptur so eingestellt, dass er unterhalb des Fracdrucks des Gebirges, also in diesem Fall des Wirtsgesteins, bleibt. Deshalb ist die Einwirkung des FEP „**Quellen des Bentonits**“ auf das Teilsystem Wirtsgestein nur als gering zu bewerten.



Beim FEP „**Auflösung und Ausfällung**“ besteht bereits für das Nahfeld sowie die Strecken und Schächte beschrieben eine starke Abhängigkeit vom Lösungsangebot und dem geochemischen Milieu.

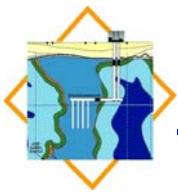
Die im Wirtsgestein vorhandenen Lösungen stehen im thermodynamischen Gleichgewicht mit den Mineralphasen des jeweiligen Salzgestein. Die sich im Gleichgewicht befindenden Auflösungs- und Ausfällungsprozesse haben keine Auswirkungen auf das Wirtsgestein. Eine Auflösung von anstehendem Gestein durch solche Lösungen ist daher nicht zu berücksichtigen.

Änderungen dieses Zustandes und somit die Möglichkeit von Auflösungen können nur in unmittelbarer Nähe zum eingebrachten Versatz und gegebenenfalls durch zutretende Wässer im Bereich der Schächte sowie am Salzspiegel auftreten. Der Prozess der chemischen und mechanischen Abtragung des Salzgestein durch Grundwasser bei der Beschreibung des FEP „Subrosion“ behandelt. Nach Überschreiten von Löslichkeitsgrenzen können Inhaltsstoffe von Lösungen jedoch unter Bildung von festen Phasen wieder aus der Lösung ausfallen. Des Weiteren sind diese Ausprägungen stark abhängig vom Druck und von der Temperatur. In der Regel können gesättigte Lösungen bei einer Druck- oder Temperaturerhöhung zusätzliche Salze lösen, während bei einer entsprechenden Erniedrigung Salze ausfallen. Für die temperaturabhängigen Prozesse gilt im Wirtsgestein auch bei diesem FEP, dass eine Intensitätsabnahme und Zeitverzögerung mit zunehmender Entfernung von den Einlagerungsfeldern auftritt.

Insgesamt sind die Auswirkungen von Auflösungs- und Ausfällungsprozessen für das Wirtsgestein als gering einzuschätzen.

Das „**Absinken der Abfallbehälter**“ und der damit verbundene „Feststoffgebundene Radionuklidtransport“ wirken sich, wie bereits für das Teilsystem „Nahfeld“ erläutert, besonders in der thermischen Phase der radioaktiven Abfälle aus. Für das Referenzszenario wird angenommen, dass eine Sicherheitsrelevanz durch das Absinken der Abfallbehälter nicht gegeben ist, da die Hauptsalzmächtigkeit unterhalb des Einlagerbereichs größer ist als ein zu erwartendes Absinken der Behälter. Dies wird aufgrund des geringen Dichteunterschiedes selbst über lange Zeiträume als gering eingestuft.

Die andere zu betrachtende Form des „**Feststoffgebundenen Radionuklidtransports**“ ist der Diapirismus, der zu einer Lageänderung des Einlagerungsbereichs um 70 m innerhalb



von einer Million Jahren führen kann. Eine derartige Verlagerung hätte aufgrund der oberhalb des Einlagerungsbereichs verbleibenden Steinsalzmächtigkeit keine sicherheitsrelevante Bedeutung zumal das Absinken der Behälter zu einer Verringerung des Aufstiegsbetrags führen würde.

Die „**Rissbildung**“ wirkt sich vor allem in den ersten bis zu einigen 10.000 Jahren aus. Eine Sicherheitsrelevanz dieser Prozesse ist in dem Teil des Wirtsgesteins gegeben, der als „einschlusswirksamer Gebirgsbereich“ festgelegt wurde. Wie bereits in den Teilsystemen „Nahfeld“ sowie „Strecken und Schächte“ dargestellt, ist die konturnahe „Auflockerungszone“ nur solange sicherheitsrelevant, bis sich die Risse durch den Stützdruck der Grubenraumverfüllung schließen und wieder verheilen. Dies dürfte nach einigen Hundert bis wenigen tausend Jahren der Fall sein.

Veränderungen der Spannungen im Wirtsgestein können durch geänderte Gebirgsauflasten (Eisüberdeckung, Meeresüberflutung) oder Gesteinsexpansion bzw. -kontraktion durch die wärmeproduzierenden Abfälle oder Klimaänderungen auftreten. Einsetzen und Ausmaß der thermisch bedingten Expansion des Wirtsgesteins sind abhängig vom Abstand zum Einlagerungsbereich. Nach einem Temperaturmaximum nach einigen Zehner und Hunderten Jahren ist das Gebirge nach ca. 10.000 Jahren wieder auf die natürlichen Temperaturen abgekühlt. Als Folge resultierender Spannungsänderungen können sich geschlossene Risse wieder öffnen bzw. neue Risse entstehen. Diese Prozesse wurden im Teilsystem „Strecken und Schächte“ ausführlich dargestellt.

Am Kontakt zwischen Gesteinen mit unterschiedlichem Verformungsverhalten (z. B. Steinsalz – Hauptanhydrit) können besonders große Spannungsgradienten entstehen. Der Hauptanhydrit zeigt ein sprödes Materialverhalten, so dass sich bei entsprechenden initialen Spannungsbedingungen durch Druckspannungen lokal Wegsamkeiten bilden können. Aufgrund seiner nachgewiesenen zerblockten Struktur sind aus diesem Prozess jedoch keine Beeinträchtigungen der Wirtsgesteinsintegrität abzuleiten. Im duktilen Steinsalz können Zugspannungen entstehen, die mit der Bildung von Wegsamkeiten einhergehen können. In diesem Fall wäre eine Beeinträchtigung der Integrität nicht ausgeschlossen. Am Salzspiegel können Wegsamkeiten gebildet werden, wenn die kleinste Hauptnormalspannung kleiner wird als der hydrostatische Druck einer im Hugestein anstehenden Lösung und diese Lösung in das Wirtsgestein eindringt.



5.3. Wirtsgestein

Das FEP „**Imprägnierung**“ hat eine direkte Einwirkung im Teilsystem Wirtsgestein, es wird auch nur in diesem berücksichtigt. Im Bereich der Erkundungs- und der Einlagerungssohle am Referenzstandort beträgt der lithostatische Druck ca. 18 MPa. Bauen sich dort infolge Konvergenz oder Gasentwicklung Gasdrücke in dieser Größenordnung auf wird Gas in das Wirtsgestein infiltrieren. Da die Gasbildung im Referenzszenario nur sehr schwach ausgeprägt ist, sind Gasdrücke oberhalb des lithostatischen Druckes nicht zu betrachten, eine Gasinfiltration in das Wirtsgestein findet nicht statt.

Bei den langfristig im Zeitraum von etwa 50.000 Jahren bis eine Million Jahre wirksamen FEPs zeigt das FEP „**Subrosion**“ Auswirkungen im Wirtsgestein.

Am Referenzstandort kann Subrosion (Ablaugung leichtlöslicher Gesteine) durch gering mineralisierte Grundwässer am Salzspiegel auftreten. In der Vergangenheit fand dies verstärkt durch eine den Salzspiegel berührende Rinne und kaltzeitliche Prozesse statt. Als langfristige Subrosionsraten wurden Werte zwischen 0,01 und 0,005 mm/Jahr ermittelt (ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R. et al. 2004). Die Tieflage des Salzspiegels und die dort vorherrschenden hochsalinen Grundwässer sowie Isotopendatierungen an Grundwässern weisen auf eine geringe rezente Subrosion hin.

Im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre könnte es bei Zugrundelegung der langfristigen Raten zu einer Ablaugung von 10 m bis 20 m Salzgestein kommen. Eine Relevanz für die Sicherheit ist daher nicht gegeben.

Wie bereits im Teilsystem Strecken und Schächte detailliert beschrieben wirkt der „**Permafrost**“ langfristig auch im Wirtsgestein. Am Referenzstandort können abhängig von Intensität und Dauer einer neuen Kaltzeit Permafrostmächtigkeiten von etwa 200 m auftreten. Da der Salzspiegel unterhalb dieser anzunehmenden Mächtigkeit liegt sind die Einwirkungen auf das Wirtsgestein nur über die Abkühlung ohne die Entstehung von kryogenen Rissen zu erwarten.

Die „**Vollständige Inlandvereisung**“, die im Teilsystem Strecken und Schächte bereits beschrieben wurde, ist wie der Permafrost abhängig von der Intensität und Dauer einer neuen Kaltzeit.



5.3. Wirtsgestein

Aus der Elster-Kaltzeit und in geringem Maße auch aus der Saale-Kaltzeit sind Rinnensysteme bekannt, die bis in einige hundert Meter Tiefe reichen und eine hohe Erosionsleistung während der Kaltzeiten belegen. Am Referenzstandort wäre bei einer zukünftigen Rinnenentstehung auch die Erosion von Hut- und Salzgestein möglich, wodurch der Salzstock zusätzlich verstärkt mit gering mineralisierten Grundwässern in Kontakt käme.

Durch die Überfahrung des Referenzstandortes mit Inlandeis entsteht ein erhöhter Überlagerungsdruck, der aber nur geringe Auswirkungen haben dürfte, da am Referenzstandort nur mit Inlandeismächtigkeiten von einigen hundert Metern zu rechnen ist. Außerdem ist davon auszugehen, dass eine erneute Inlandvereisung zeitlich nicht genügend lange wirksam ist, um einen weiteren Salzaufstieg mit den damit verbundenen deutlichen Strukturveränderungen im Wirtsgestein auszulösen.



5.4. Deck- und Nebengebirge

Im Teilsystem 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. In Tabelle 6 sind die FEPs aufgelistet, die im Betrachtungszeitraum im Deck- und Nebengebirge Ausprägungen aufweisen.

Tab. 6: Übersicht der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden FEPs mit zeitlicher Einordnung der als sicherheitsrelevant zu betrachtenden Einwirkung am Referenzstandort

FEP Nr.	FEP Titel	immer zu erwarten: keine zeitliche Beschränkung	kurzfristig zu erwarten: erste 1000 bis einige 10 ka	langfristig zu erwarten: ca. 50 - 100 ka bis 1000 ka
1.2.07.01	Erosion	X		
1.3.04.01	Permafrost			X
1.3.05.02	Vollständige Inlandvereisung			X
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	X		

Mit einer immer zu erwartenden Einwirkung auf das Teilsystem ist das FEP „**Auflösung und Ausfällung**“ eingestuft, das bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde. In diesem Teilsystem treten Auswirkungen hauptsächlich im Hutgestein auf, da dort Sedimente vorliegen, die bei entsprechendem Chemismus, z. B. des Grundwassers, in Lösung gehen können. Außerdem ist in diesem Bereich auch mit Ausfällungen zu rechnen.

Ebenfalls ohne zeitliche Beschränkung wirkt die „**Erosion**“ auf das Deck- und Nebengebirge ein, die bereits im Teilsystem Strecken und Schächte beschrieben wurde.

Eine Erhöhung der Erosionsleistung am reliefarmen und von Absenkungstendenzen betroffenen Referenzstandort ist während einer Kaltzeit durch Gletscherschurf (Exaration) möglich, die mit der Bildung tiefer Rinnen einhergeht. Für die Mächtigkeitsbilanz der Deckgebirgschichten können diese Vorgänge im Ergebnis neutral sein, wenn das erodierte Material rasch durch neue Sedimente ersetzt wird. Dies geschieht z. B. durch Auffüllung von Rinnen und Hohlformen sowie durch Bildung von Sanderflächen und Moränen.



Im Deck- und Nebengebirge des Referenzstandortes ist für den bereits ausführlich im Teilsystem Strecken und Schächte diskutierten „**Permafrost**“ zu berücksichtigen, dass sandige Schichten schneller gefrieren als tonige. Außerdem bleiben unterhalb größerer Gewässerflächen (Seen, Flüsse) ungefrorene Bereiche (Taliki) erhalten. Dies würde am Referenzstandort z. B. für die Schichten unterhalb der Elbe gelten.

Durch diese Vorgänge können die hydrogeologischen Verhältnisse dahingehend beeinflusst werden, dass ein Grundwasserfluss nur in der sommerlichen Auftauschicht an der Erdoberfläche oder unterhalb des Permafrostes möglich ist. Zudem ist die Grundwasserneubildung bei kontinuierlichem Permafrost äußerst begrenzt und erfolgt ebenfalls nur saisonal. Auch Grundwasseraustritte sind nur an der Auftauschicht oder im Bereich der Taliki möglich. Der geänderte Grundwasserchemismus kann zu Mineralanreicherungen in bestimmten Zonen des Permafrostes und zur Entstehung von Salzwasserquellen führen. An der Oberfläche wirkt sich der Permafrost auf die Entstehung von Flussgrundrisstypen aus, wodurch Taliki verlagert werden können. Änderungen der Erosionsvorgänge, Solifluktion oder Eiskeilbildungen können zu einer Umgestaltung des Reliefs führen. Insgesamt wird es zu einer oberflächennahen Umlagerung der Deckschichten kommen.

Dadurch und durch die beschriebenen Beeinflussungen der hydrogeologischen Verhältnisse am Referenzstandort kann der Permafrost Einfluss auf eine etwaige Ausbreitung von Radionukliden bis ins Fernfeld des Endlagers haben.

Auch im Deck- und Nebengebirge wirkt die im Teilsystem Strecken und Schächte genauer beschriebene „**Vollständige Inlandvereisung**“ langfristig ein.

In Zukunft ist am Referenzstandort mit einer Eisüberdeckung zu rechnen, in deren Verlauf die oberflächennahen Schichten des Deck- und Nebengebirges von Exaration und/oder eistektonisch hervorgerufenen Störungen betroffen sein werden. In der Vergangenheit reichten Lagerungsstörungen bis in Tiefen von ca. 100 bis 150 m. Auch die Anlage von Rinnensystemen, z. B. durch eisrandnahe Schmelzwässer, die unter hohem Druck stehen und an der Basis des Inlandeises mit hoher Erosionsleistung kurzfristig abflossen, kann das Deck- und Nebengebirge bis in einige Hundert Meter Tiefe verändern. Am Referenzstandort verbreitete tonige, gering wasserleitende Schichten, wie z. B. Lauenburger Ton und Holstein-Ton, könnten durch sandige Sedimente ersetzt werden. Gleichzeitig ist bei der Rinnenbildung ein Austausch von Ablaugungswässern mit Frischwasser über einem Salzstock möglich. Insgesamt verändern diese Vorgänge die Hydrogeologie am Referenzstandort mit der gleichen Konsequenz wie zuvor beim Permafrost genannt.



6. Diskussion und Ausblick

Im Rahmen des Projektes ISIBEL wurde in der ersten Phase ein FEP-Katalog erstellt, der die Grundlage der vorliegenden Referenzszenarioableitung darstellt. Ziel der zweiten Phase des Projektes ist die Entwicklung und der Test einer Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios, das entsprechend der Definition eine möglichst große Gesamtheit von als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des Endlagersystems hinsichtlich der Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktionen abdeckend abbildet.

In einem ersten Schritt setzt die Methode bei der Identifizierung von FEPs an, deren Auswirkungen die einschlusswirksamen Barrieren (ewB) beeinflussen und die damit hinsichtlich der Referenzszenariodefinition maßgeblich sind. Dabei standen vor allem die negativen Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der ewB im Vordergrund. Als Auswahlkriterium wurde entsprechend der Definition des Referenzszenarios festgelegt, dass die FEPs ein wahrscheinliches Eintreten aufweisen und direkt auf die ewB einwirken müssen. Damit ist jedoch noch keine Aussage darüber getroffen mit welcher Intensität das jeweilige FEP wirkt und welche Ausprägung es aufgrund seiner Abhängigkeiten von anderen FEPs annehmen kann. Deshalb wurden in einem zweiten Schritt in die inhaltliche Beschreibung die im FEP-Katalog angegebenen Abhängigkeiten von „auslösenden“ und „beeinflussenden“ FEPs bis in die 2. Ebene aufgenommen, um die Ausprägungen der jeweiligen zu betrachtenden FEPs bestimmen zu können. Eine Beschreibung bis über die 2. Ebene hinaus war nicht nötig, da sich bis dort in den Abhängigkeiten bereits alle wesentlichen FEP-Inhalte zur Beschreibung der Ausprägungen wiederfinden. In weiteren Ebenen würden sich zwar zusätzliche Wirkkombinationen von FEPs ergeben, jedoch befinden sich darunter keine FEPs, die nicht schon vorher mit ihren Wirkungen auf die Ausprägung des zu betrachtenden FEP berücksichtigt wurden. Erweitert wurde die Methode dadurch, dass für die Ableitung der FEP-Ausprägungen bestimmte Prämissen gewählt wurden, um bei einer formalen Berücksichtigung aller FEP-Abhängigkeiten die wenig wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems aus dem Referenzszenario ausschließen zu können. Weitere Prämissen wurden gesetzt, da das Referenzszenario in diesem Bericht ein Test der entwickelten Methode und nicht Teil eines Sicherheitsnachweises ist. Daher war es zulässig, zur Festlegung von Randbedingungen in denjenigen Fällen, in denen keine ausreichende Datenbasis vorlag, entsprechende Prämissen zu setzen.

Die zuvor beschriebene Methodik führte zu einer Ableitung des Referenzszenarios auf Basis der Inhalte des FEP-Kataloges (Version 1). Weiterhin wird mit dem Vorgehen eine Grundlage zur Ableitung von Alternativszenarien geschaffen. Diese ergibt sich einerseits aus den für das Referenzszenario aufgestellten Prämissen und andererseits aus dem entsprechenden



methodischen Vorgehen, in dem aus dem FEP-Katalog die FEPs und Angaben zu Ausprägungen, die wenig wahrscheinliche Entwicklungen des Systems beschreiben, ausgewählt und für die Ableitung von Alternativszenarien genutzt werden.

Im Rahmen der Beschreibung und Ableitung des Referenzszenarios durch das ISIBEL-Team und parallel durch eine externe Revision des FEP-Kataloges konnten inhaltliche Schwächen aufgedeckt werden. In diesem Zusammenhang wurden die Einstufungen der FEPs bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit, der Art der Einwirkung auf die ewB und der Handhabung ebenfalls überprüft und überarbeitet. Als Ergebnis entstand aus den Überarbeitungen die neue Version 2 des FEP-Kataloges. Das vorliegende Referenzszenario weicht allerdings aufgrund der zeitgleichen Erstellung in seinen Inhalten von dieser Version 2 ab. Deshalb sollte die entwickelte Methode noch einmal anhand dieses neuen FEP-Kataloges angewendet werden, um zu prüfen, ob auch basierend auf diesem Katalog ein stimmiges Referenzszenario abgeleitet werden kann. Dies würde sowohl der Funktionskontrolle der entwickelten Methode als auch der Qualitätskontrolle der Inhalte des FEP-Kataloges der Version 2 dienen.

Die zu erstellenden Alternativszenarien werden im Nachfolgeprojekt in ISIBEL-II aus der Version 2 des Kataloges abgeleitet. Um diese mit dem Referenzszenario in einem Gesamtkontext einer Langzeitsicherheitsanalyse betrachten zu können, ist es erforderlich, dass das dazugehörige Referenzszenario aus der gleichen Datenbasis abgeleitet wurde. Daher sollte entsprechend zu den Alternativszenarien ein auf dem FEP-Katalog Version 2 basierendes Referenzszenario abgeleitet werden.

Insgesamt liefert die Methode ein detailliertes Abbild der als wahrscheinlich anzusehenden Entwicklungen des Endlagersystems und gibt die zu berücksichtigenden Veränderungen mit potenziellen direkten Beeinträchtigungen der Funktion der einschlusswirksamen Barrieren bis in einer Million Jahre abdeckend wieder. Aufgrund der großen Anzahl unterschiedlicher Informationen, die vor allem durch die Berücksichtigung der FEP-Abhängigkeiten bis in die 2. Ebene zusammenkommen, ist die Methode sehr aufwändig. Sie bietet jedoch die Möglichkeit, Szenarien auch bei sehr umfangreicher Datenbasis in transparenter und nachvollziehbarer Weise abzuleiten, wodurch dieser Aufwand gerechtfertigt ist. Für das Verständnis der Entwicklungsmöglichkeiten des Gesamtsystems wird im Projekt ISIBEL-II geprüft, ob die Methode auch geeignet ist die Alternativszenarien ausreichend gut abzubilden.



7. Literaturverzeichnis

POPP, T.; WIEDEMANN, M.; BÖHNEL, H., MINKLEY, W. (2007): Untersuchungen zur Barrierefestigkeit im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Abschlussbericht Forschungsvorhaben SR 2470, BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, SALZGITTER.

BECHTHOLD, W., ROTHFUCHS, T., POLEY, A., GHOREYCHI, M., HEUSERMANN, S., GENS, A. & OLIVELLA, S. (1999): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project). – European Commission, Nuclear Science and Technology, Final Report, EUR 19124 EN; Luxemburg.

BECHTHOLD, W., SMAILOS, E., HEUSERMANN, S., BOLLINGERFEHR, W., BAZARGAN SABET, B., ROTHFUCHS, T., KAMLOT, P., GRUPA, J., OLIVELLA, S. & HANSEN, F.D. (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project). – European Commission, Nuclear Science and Technology, Final Report, EUR 20621 EN; Luxemburg.

BUHMANN, D., EBERTH, S., KELLER, S., KREIENMEYER, M., KRONE, J., MÖNIG, J., THOLEN, M., WEBER, J. R. & WOLF, J. (2008): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. – DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-11-2008-AB: 582 S.; Peine.

RÖHLIG, K.-J., APPEL, D., KIENZLER, B., LUX, K. H., ODOJ, R., & PLISCHKE, E. (2010): Review des im Vorhaben "Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW" (ISIBEL) erstellten FEP-Katalogs Abschlussbericht. – Unveröffentl. Ber. TU Clausthal: 77 S.; Clausthal-Zellerfeld.

MÜLLER, W. & THOLEN, M. (2009): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. atw 54.Jg., Heft 5, Berlin.

ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R., BORNEMANN, O., FLEIG, S., HOFFMANN, N., KÖTHE, A., KRULL, P., & WEISS, W. (2004): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- und Nebengebirges. Abschlussbericht. – BGR, unveröffentl. Ber.: 570 S.; Hannover