

GSF
FORSCHUNGSZENTRUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT
FORSCHUNGSBERGWERK ASSE

Szenariientwicklung Asse

November 2006

Colenco Bericht 3331/99
(Revision von Colenco-Bericht 4927/07)

Colenco Power Engineering AG
Baden, Schweiz

Grundwasserschutz und Entsorgung

GSF
FORSCHUNGSZENTRUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT
FORSCHUNGSBERGWERK ASSE

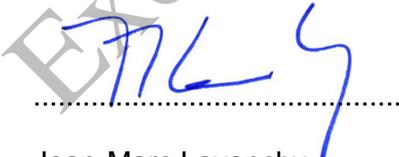
Szenariientwicklung Asse

November 2006

Colenco Bericht 3331/99
(Revision von Colenco-Bericht 4927/07)

Colenco Power Engineering AG
Baden, Schweiz

Verfasser: Dr. G. Resele



.....
Jean-Marc Lavanchy
Leiter Geschäftsbereich



.....
Dr. Georg Resele
Chefprojektleiter

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1	Einleitung 7
1.1	Schachanlage Asse 8
1.2	Langzeitsicherheitsnachweis und Szenarienentwicklung 9
1.3	Grundlagen, Methodik und Berichtsaufbau 10
2	Sicherheitskonzept und Schließungskonzept 12
2.1	Rahmenbedingungen 12
2.2	Sicherheitskonzept 13
2.3	Schließungskonzept 16
3	Methodik der Szenarienentwicklung 25
4	Multibarrierensystem (MBS) 29
4.1	Kompartimente des Teilsystems Nahfeld 29
4.2	Wirtsgestein 30
4.3	Hutgestein und Deckgebirge 31
4.4	Biosphäre 31
5	Systembeschreibung Geosphäre 33
5.1	Heutige Verhältnisse am Standort 33
5.1.1	Gebirgsmechanische Verhältnisse 34
5.1.2	Lösungszutritt 38
5.1.3	Transportpfade für Grubenlösung und Gas im Wirtsgestein 42
5.1.3.1	Wegsamkeit durch gebirgsmechanisch gestörte Bereiche zur SW-Flanke 42
5.1.3.2	Wegsamkeit entlang der Tagesschächte 44
5.1.3.3	Wegsamkeit entlang nichtchloridischer Horizonte 45
5.1.3.4	Wegsamkeit entlang Kaliflözen in Verbindung mit Umlösung 46
5.1.3.5	Wegsamkeiten entlang alten Bohrungen und peripheren Grubenbauen 46
5.1.4	Transport von Radionukliden im Hutgestein und Deckgebirge 48
5.1.4.1	Randbedingungen 48
5.1.4.2	Pfad mit Hochpressen der Grubenlösung entlang des Rötanhydrit zum Salzspiegel und Transport nach Groß Denkte 51
5.1.4.3	Pfade mit ausgeprägtem Anteil im Rötanhydrit 54
5.1.4.4	Pfade durch den Röttaquitard in der Südflanke 55
5.1.4.5	Pfade ausgehend vom verstürzten Deckgebirge SE der Grundwasserscheide 57
5.1.4.6	Pfade mit Übertritt in die Muschelkalkaquifere 60
5.1.5	Übersicht über die Transportpfade für Grubenlösung im Deckgebirge 62
5.2	Langzeitentwicklung des Standortes 63
5.2.1	Übersicht 63
5.2.2	Referenzentwicklung des Standortes 65
5.2.3	Alternative Klimaentwicklung (mit Vergletscherung des Standortes) 72
5.2.4	Klimaunabhängige externe Einwirkungen 74

6	Asse-spezifische FEP-Liste.....	76
6.1	Vollständigkeit und Klassierung der FEP.....	76
6.2	Schnittstelle zwischen Nahfeld und Geosphäre.....	78
7	Szenarien-Entwicklung.....	82
7.1	Konzeptuelles Vorgehen	82
7.2	Szenarien für das Nahfeld.....	83
7.3	Szenarien für die Geosphäre	86
7.3.1	Szenariengruppe des Referenzszenarios.....	86
7.3.2	Geosphären-Szenariengruppe vD-W „verstärktes Deckgebirge – West“	88
7.3.3	Geosphären-Szenariengruppe vD-E „verstärktes Deckgebirge – Ost“	90
7.3.4	Szenariengruppe vZdSB „vergrößerte Zone der desintegrierte Steinsalz-Barriere“	91
7.3.5	Szenariengruppe GTs „Gasabfluss entlang Tagesschächte“	92
7.3.6	Szenariengruppe Vg „Vergletscherung des Standortes“	93
7.4	Kombinationen von Szenariengruppen für das Nahfeld und die Geosphäre.....	95
8	Schlussfolgerungen.....	96
9	Literaturverzeichnis	104
	Abbildungen	Abb-1
	Anhänge.....	Anh-1

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1	Veränderungen der Höhen- und Tiefenlagen ausgewählter Teile des Systems in den kommenden 150'000 Jahren.....	69
Tabelle 7-1	Mögliche Kombinationen der Szenariengruppen für das Nahfeld und die Geosphäre.....	95

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1	Unterteilung des Multibarrierensystems (MBS) in die einzelnen Teilsysteme	Abb-1
Abbildung 4-2	Schematische Darstellung der topologischen Anordnung der Nahfeld-Kompartimente	Abb-1
Abbildung 5-1	Schematisches Diagramm der potentiellen Fließwege für den Transport von Radionukliden in Lösung durch die Geosphäre	Abb-2
Abbildung 5-2	Schematische Skizze der potentiellen Fließwege für den Transport von Radionukliden in Lösung im Deckgebirge	Abb-4
Abbildung 5-3	Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und langzeitsicherheitsrelevanten FEP	Abb-5
Abbildung 5-4	Einfluss-Matrix der geologischen/hydrogeologischen FEP zur Langzeitentwicklung.....	Abb-6

Verzeichnis der Anhänge

Anhang A:	Asse-spezifische FEP-Liste	Anh-1
Anhang B.1:	Szenarientwicklung für das Nahfeld: FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G	Anh-19
Anhang B.2:	Szenarientwicklung für die Geosphäre: FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _N	Anh-21
Anhang C.1:	Vollständige Liste der FEP der Klasse A.....	Anh-23
Anhang C.2:	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G für das Nahfeld-Referenzszenario	Anh-35
Anhang C.3	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G für die Nahfeld-Szenariengruppe acM.....	Anh-36
Anhang C.4	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G für die Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW	Anh-37
Anhang C.5	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G für die Szenariengruppe vZdSB.....	Anh-38

Anhang C.6	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe GTs.....	Anh-39
Anhang C.7	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe Vg	Anh-40
Anhang C.8	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für das Referenzszenario.....	Anh-41
Anhang C.9	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Geosphären-Szenariengruppe vD-W	Anh-42
Anhang C.10	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Geosphären-Szenariengruppe vD-E	Anh-43
Anhang C.11	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe vZdSB.....	Anh-44
Anhang C.12	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe GTs.....	Anh-45
Anhang C.13	Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe Vg	Anh-46

Exemplar für BMBF und BMU

1 Einleitung

Die Szenarientwicklung bildet einen wesentlichen Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises: Sie umfasst die Identifikation der erkannten und möglichen Sachverhalte, Ereignisse, Prozesse sowie der künftigen möglichen Entwicklungen des Systems, die zu einer Freisetzung von Schadstoffen aus den eingelagerten Abfällen bis in die Biosphäre führen können. Sie beschreibt insbesondere die technischen und natürlichen Barrieren sowie die sonstigen Verhältnisse am Standort und deren mögliche künftige Entwicklungen. Nicht zuletzt identifiziert sie die potentiellen Ausbreitungspfade von Schadstoffen von den Abfallgebänden bis in die Biosphäre. Sie stellt eine wichtige Grundlage dar für die interne und externe Kommunikation zur Langzeitsicherheit, für die Entwicklung des Sicherheitskonzeptes, für den quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit und für die Identifikation und Ermittlung der sicherheitsrelevanten Daten.

Der vorliegende Bericht zur Szenarientwicklung behandelt grundsätzlich das Gesamtsystem „Standort Asse“, konzentriert sich aber auf die Geosphäre, d.h. das Teilsystem „Hutgestein und Deckgebirge“ und das Wirtsgestein, die im Detail beschrieben werden. Grundlage der Szenarientwicklung für die Geosphäre bilden u.a. die „Hydrogeologischen Modellvorstellungen“ [Colenco 2006a] und die Geowissenschaftliche Langzeitprognose [Colenco 2005a]. Die Szenarientwicklung für das Teilsystem „Nahfeld“ erfolgt in einem gesonderten Bericht [Colenco 2006c]. Das Ergebnis, die Nahfeld-Szenarien, wird im vorliegenden Bericht zusammenfassend beschrieben, die Schnittstellen mit der Geosphäre ausführlich diskutiert und die beiden Teilsysteme zum Gesamtsystem „Standort“ zusammengefügt. Hierbei wird das Teilsystem „Biosphäre“ mit berücksichtigt.

Einen wichtigen Teil der Szenarientwicklung bildet die Systembeschreibung, d.h. die Beschreibung des Systems „Schachanlage Asse“ und seiner Eigenschaften, der heute und möglicherweise in der Zukunft ablaufenden Prozesse und eintretenden Ereignisse, soweit diese den Einschluss der Schadstoffe oder deren Freisetzung beeinflussen können. Diese Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse werden zusammenfassend FEP genannt, als Abkürzung der entsprechenden englischen Ausdrücke „features“, „events“ und „processes“. Gestützt auf die Systembeschreibung werden die sicherheitsrelevanten FEP identifiziert und für die weitere Verwendung in der Szenarientwicklung Asse-spezifisch definiert. International anerkannte FEP-Listen (u.a. [OECD 2000], [Prij 1993] und [USDOE 1996]) ermöglichen anschließend, die identifizierten FEP auf Vollständigkeit zu überprüfen, d.h. eventuelle weitere, bislang nicht erkannte sicherheitsrelevante Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse in die Sicherheitsanalyse einzu beziehen.

Die als potentiell sicherheitsrelevant erkannten FEP werden in einem dritten Schritt zu Szenarien zusammengefügt. Szenarien sind drehbuchartig beschriebene Entwicklungen des Systems, eingeschlossen das Eintreten oder Ausbleiben von Ereignissen, von denen jede eine mögliche Zukunft des Systems beschreibt. Die Gesamtheit aller Szenarien deckt sämtliche möglichen heutigen Zustände und künftigen Entwicklungen des Gesamtsystems ab. Die Szenarien werden in Szenariengruppen zusammengefasst. Das repräsentative Szenario einer Szenariengruppe ist ein Szenario, das für die Szenariengruppe typisch ist und hinsichtlich Langzeitsicherheit möglichst viele Szenarien der Gruppe abdeckt. Varianten sind weitere Szenarien einer Gruppe, die definiert werden, um die gesamte Szenariengruppe ausreichend abdeckend in der Sicherheitsanalyse zu behandeln. Die repräsentativen Szenarien und ihre Varianten werden hinsicht-

lich Eintretenswahrscheinlichkeit und Prognoseunsicherheit bewertet. Das Referenzszenario ist das repräsentative Szenario der Szenariengruppe, deren Eintretenswahrscheinlichkeit am höchsten ist.

Die Definition und gegenseitige Abgrenzung von einzelnen Szenarien und Szenariengruppen ist nicht objektiv vorgegeben, sie ist Ergebnis einer Wahl des Analysten. Objektiv nachweisbar muss jedoch sein, dass die im Sicherheitsnachweis berücksichtigten Szenariengruppen, ihre repräsentativen Szenarien und Varianten alle relevanten möglichen Zustände und Entwicklungen abdecken. Es liegt in der Natur eines Sicherheitsnachweises, dass die gewählten Szenarien durchwegs zu einer Freisetzung von Schadstoffen in die Biosphäre führen und auf mehr oder weniger ungünstigen Annahmen beruhen. Für eine einfache und nachvollziehbare Nachweisführung werden die Szenarien zudem so gewählt, dass mit einer möglichst geringen Anzahl Szenarien die Forderung nach Vollständigkeit erfüllt wird. Unter allen möglichen Zuständen und Entwicklungen des Systems beschreiben die Szenarien eines Langzeitsicherheitsnachweises, auch das Referenzszenario, deshalb selektiv ungünstige Verhältnisse und zeichnen nicht ein objektiv repräsentatives Bild der Zukunft des Gesamtsystems und dessen Auswirkungen auf die belebte Umwelt.

Der vorliegende Bericht zur Szenariientwicklung behandelt den Zustand des Gesamtsystems nach Ausführung der vorgesehenen technischen Maßnahmen zur Schließung der Schachtanlage Asse und dessen mögliche Entwicklungen ohne menschliches Eingreifen. Zukünftige menschliche Handlungen mit Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit des Systems, wie z.B. künftige Explorationstätigkeiten oder bergbauliche Aktivitäten in der Salzstruktur Asse, erfordern methodisch ein anderes Vorgehen und werden hier nicht behandelt.

1.1 Schachtanlage Asse

Die Schachtanlage Asse II diente von 1908 bis 1964 der Salzgewinnung. Es entstanden 131 Abbaukammern im Staßfurt- und Leine-Salinar mit einem Gesamtvolumen von ca. 3'350'000 m³. Die Kammern liegen in der NE- (Kalisalz) und SW-Flanke (Steinsalz) der Sattelstruktur. Sie befinden sich in einer Teufe von 490 m bis 775 m.

Im Jahr 1965 wurde die GSF Eigentümerin des Bergwerks Asse und von der Bundesregierung beauftragt, „Forschungen auf dem Gebiet der Tieflagerung radioaktiver Abfälle“ durchzuführen. Mittels verschiedener Techniken wurden zwischen 1967 und 1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle zu Forschungszwecken eingelagert. Die schwachradioaktiven Abfälle (LAW) lagern in elf Abbaukammern der Jüngeren (Na3) und Älteren Steinsalz-Formation (Na2) auf der 750-m-Sohle und in einer Abbaukammer der Älteren Steinsalz-Formation (Na2) auf der 725-m-Sohle. Die mittelradioaktiven Abfälle (MAW) befinden sich in der Abbaukammer 8a auf der 511-m-Sohle.

Seit 1979 wird das Bergwerk ohne weiteres Einbringen von Abfällen als Forschungsanlage für die Entwicklung von Technologien zur Endlagerung toxischer Abfälle genutzt. Dazu wurden Sohlen zwischen 800 m und 975 m Teufe aufgefahren sowie Tages- und Blindschächte erweitert bzw. neu geteuft. Das anfallende Salzhautwerk wurde zur Verfüllung alter Abbaue genutzt. Im Dezember 1989 waren 850'000 m³ der ursprünglichen 3'350'000 m³ Hohlraum verfüllt. Seit 1990 wurden keine größeren Auffahrungen mehr durchgeführt.

Die Schachanlage Asse II ist mit zwei Tagesschächten, den Schächten Asse 2 und Asse 4 erschlossen. Der Schacht Asse 2 wurde zu Beginn der Gewinnungsphase abgeteuft, der Schacht Asse 4 im Rahmen der Nutzung als Forschungsbergwerk.

Während der Gewinnung der Kalisalze in den 20er Jahren wurde der Rückstand aus der Aufbereitung der Kalisalze wieder in die Abbaue des Carnallit-Baufeldes versetzt. Dieser Versatz wird als „Altversatz“ bezeichnet. Das beim Auffahren des Tiefenaufschlusses zu Forschungszwecken in den 80er und 90er Jahren anfallende Salzhautwerk wurde in einzelne Abbaue in der Südflanke von der 725-m- bis zur 637-m-Sohle eingebracht. Dieser Versatz wird als „Eigenversatz“ bezeichnet.

Im Jahr 1995 begann die systematische Verfüllung der nicht mit radioaktiven Abfällen versetzten Abbaukammern im Baufeld in der Südflanke mit Rückstandssalzen der Halde Ronnenberg mit dem Ziel, die Tragfähigkeit und die Kontur des Grubengebäudes während der Betriebsphase zu stabilisieren. Diese Versatzmaßnahme ist abgeschlossen.

Seit 1988 tritt dem Grubengebäude kontinuierlich, mit stufenweise, seit 1998 aber nur noch langsam ansteigender Rate eine an Halit und Anhydrit gesättigte Lösung zu. Derzeit beträgt die Zutrittsrate $12,5 \text{ m}^3$ pro Tag. Geologisch-tektonische Erkundungen und deren Bewertung, gebirgsmechanische Analysen und geochemische Untersuchungen führen zu folgenden Schlussfolgerungen: (1) Die dem Grubengebäude an der Südflanke der Schachanlage Asse zutretende Salzlösung – der einzige Lösungszutritt mit potentieller Bedeutung für die Langzeitsicherheit – setzt sich zum Großteil aus Deckgebirgslösung zusammen und tritt demzufolge über eine oder mehrere Wegsamkeiten durch einen Bereich mit desintegrierter Steinsalz-Barriere aus dem Deckgebirge zu. (2) Die Wegsamkeiten in der Steinsalz-Barriere und im Deckgebirge sind primär auf die gebirgsmechanische Beanspruchung von Steinsalz-Barriere und Deckgebirge in den 80er Jahren zurückzuführen, sie sind eine Folge der früheren Bergbautätigkeit. (3) Der Lösungsübertritt erfolgt durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke in der Teufe der 574-m-Sohle oder darüber. In der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke sickert die Lösung dann zur Austrittsstelle in die Grube.

1.2 Langzeitsicherheitsnachweis und Szenariientwicklung

Der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase (Langzeitsicherheit) muss als umfassende Sicherheitsbewertung nach Ausführung der Schließungsmaßnahmen geführt werden und daher geologische, geotechnische, hydrogeologische, radiologische, chemotoxische und technische Aspekte umfassen. Der Sicherheitsbewertung ist eine wissenschaftlich fundierte Darstellung der möglichen zeitlichen Entwicklungen des Systems in Bezug auf seine langzeitigen Barrierenfunktionen zugrunde zu legen. Basis der Sicherheitsbewertung sind die Erkenntnisse der Standortcharakterisierung, die geowissenschaftliche Langzeitprognose sowie Langzeitsicherheitsanalysen.

In der Szenarientwicklung werden die potentiellen Entwicklungen des Systems identifiziert. In ihr müssen repräsentative Szenarien¹ ermittelt werden, deren Konsequenzen die Konsequenzen aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Szenarien abdecken. Die repräsentativen Szenarien werden eingeteilt in Szenarien, die menschliches Eindringen in das Barrierensystem zum Gegenstand haben, und alle anderen Szenarien; letztere werden als „natürliche Entwicklungen“ bezeichnet.

Zur Nachweisführung der Langzeitsicherheit sind die natürlichen Entwicklungen folgenden Szenarienklassen zuzuordnen [GRS 2006]:

- wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Betrachtungszeitraum eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist,
- weniger wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Betrachtungszeitraum eine geringe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist,
- nicht weiter zu betrachtende Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Betrachtungszeitraum eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist.

Szenarien, die der Klasse „nicht weiter zu betrachtende Szenarien“ zuzuordnen sind, brauchen in den Langzeitsicherheitsanalysen nicht behandelt zu werden. Die maßgeblichen Gründe für ihre Einordnung in diese Klasse müssen in der Szenarientwicklung dargelegt werden.

Menschliches Eindringen in das Barrierensystem der verschlossenen Schachanlage Asse kann für eine Zeit, nach der das Wissen um die Schachanlage und deren Funktion als nicht mehr gesichert angesehen werden kann, nicht ausgeschlossen werden. Der für eine systematische Szenarientwicklung erforderlichen Prognose der möglichen menschlichen Entwicklung, der menschlichen Lebensweise und des menschlichen Verhaltens über die zu betrachtenden Zeiträume fehlt die wissenschaftlich fundierte Basis. Daher sollen in der Langzeitsicherheitsanalyse nur ausgewählte Szenarien für das direkte menschliche Eindringen betrachtet werden [GRS 2006]. Da das Vorgehen zur Festlegung solcher Szenarien von jenem für die Analyse der natürlichen Entwicklungen abweicht, werden im vorliegenden Bericht Szenarien zum menschlichen Eindringen nicht definiert und diskutiert.

1.3 Grundlagen, Methodik und Berichtsaufbau

Die wichtigsten Grundlagen für die Szenarientwicklung für das Gesamtsystem „Standort Asse“ sind

- Risswerk der Schachanlage Asse, GSF-FB Asse 03/2002
- Herleitung und Beschreibung des Konzeptes zur Schließung der Schachanlage Asse GSF 2006b]
- Die Einbauorte der Strömungsbarrieren und ihre Anforderungen (Anlage 1 in GSF 2006b] und [Colenco 2005b])

¹ Der Begriff „repräsentative Szenarien“ ist hier – aber nur in diesem Kapitel – in einem weiteren Sinne zu verstehen als anderswo in diesem Bericht: Hier umfasst er neben den später als „repräsentative Szenarien“ der verschiedenen Szenariengruppen definierten Szenarien auch sämtliche Varianten.

- Technisches Konzept zum Schutz der aufgeschlossenen Carnallitbereiche vor Umlösungen infolge der Einwirkung von $MgCl_2$ -untersättigten Lösungen aus dem Deckgebirge (Schutzfluidkonzept) (Anlage 2 in GSF 2006b)
- Technisches Konzept zum Bau von Strömungsbarrieren basierend auf Erfahrungen aus dem Bau der Pilotströmungsbarriere [GSF 2005a]
- Zusammenstellung und Bewertung der Salzlösungs- und Gaszutritte im Grubengebäude der Schachanlage Asse II [GSF 2006a]
- Zusammenfassung der geologischen Grundlagen für die Langzeitsicherheitsbewertung der Schachanlage Asse II [Ercosplan 2004]
- Beschreibung der gebirgsmechanischen Verhältnisse und gebirgsmechanische Modellrechnungen [IfG 2006b]
- Hydrogeologische Modellvorstellungen [Colenco 2006a]
- Geowissenschaftliche Langzeitprognose [Colenco 2005a]

Die Szenarienentwicklung wird nach der PROSA-Methodik durchgeführt. Kapitel 3 vermittelt eine zusammenfassende Darstellung dieser Methodik, eine ausführlichere Beschreibung enthalten [Grupa 1999] und die dort aufgeführten Literaturzitate. Eine übergeordnete Übersicht zum Vorgehen gibt die Einleitung zu Kapitel 1.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt aufgebaut:

- Kapitel 2 beschreibt das Sicherheits- und das Schließungskonzept für die Schachanlage Asse.
- Kapitel 3 gibt einen kurz gefassten Überblick über die Methodik der Szenarienentwicklung und nennt die zugehörige Literatur.
- In Kapitel 4 wird das Multibarrierensystem des Standortes Asse im Hinblick auf die Anwendung der gewählten Methodik strukturiert und in Teilsysteme sowie weiter in einzelne Kompartimente unterteilt.
- Kapitel 5 beschreibt als zentrales und umfangreiches Kapitel die Geosphäre, d.h. das Teilsystem „Hutgestein und Deckgebirge“ und das Wirtsgestein, und identifiziert und bewertet die FEP. Es ist in zwei Teile gegliedert, die Systembeschreibung für die heutigen Verhältnisse und eine Beschreibung der möglichen Änderungen bei langzeitigen Entwicklungen.
- Kapitel 6 und Anhang A enthalten die standortspezifische FEP-Liste für das Gesamtsystem und Erläuterungen dazu sowie Ausführungen zum Zusammenführen der Szenarienentwicklungen „Nahfeld“ und „Geosphäre“.
- Kapitel 7 ist das zweite zentrale Kapitel, in dem die Szenariengruppen für das Gesamtsystem entwickelt und charakterisiert werden. Die Anhänge B.1 und B.2 enthalten das wesentliche Werkzeug dazu, die Tabellen mit den szenariendifferenzierenden FEP und deren Berücksichtigung in den verschiedenen Szenariengruppen. Die Anhänge C.1 bis C.13 enthalten die Listen aller zu berücksichtigenden relevanten FEP für die entwickelten Szenariengruppen.
- Kapitel 8 gibt abschließend einen zusammenfassenden Überblick über die identifizierten Szenariengruppen, diskutiert deren Eintretenswahrscheinlichkeiten und nennt Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse (FEP), welche die Systementwicklung oder die Barrierenwirkung der Geosphäre wesentlich beeinflussen.

2 Sicherheitskonzept und Schließungskonzept

2.1 Rahmenbedingungen

Die Schachtanlage Asse diente, wie in Kapitel 1.1 ausgeführt, von 1909 bis 1964 ausschließlich der Mineralgewinnung. Sie ist somit kein Bergwerk, welches für die Einlagerung radioaktiver Abfälle geplant und aufgefahren worden ist. Die Einlagerung radioaktiver Abfälle zu Forschungszwecken erfolgte erst nach der Einstellung der Salzförderung.

Für das Sicherheitskonzept und den Langzeitsicherheitsnachweis sowie die daraus abzuleitenden Maßnahmen ergeben sich daraus wesentliche Rahmenbedingungen:

1. Die zur Mineralgewinnung angelegten Abbaue im Jüngeren Steinsalz (Leine-Steinsalz) liegen in unmittelbarer Nähe zum südlichen Rand des Salzsattels. Die Mächtigkeit der Steinsalz-Barriere zum Rötanhydrit beträgt auf den Sohlen oberhalb 595 m Teufe nur wenige Meter. Das Grubengebäude ist durch einen hohen Durchbauungsgrad gekennzeichnet. Das Tragsystem der Pfeiler und Schweben wurde mit Abmessungen gebaut, die zu einem nachgiebigen Tragverhalten mit begrenzter Tragfähigkeit geführt haben.

Somit entstanden durch die unmittelbare Nähe zum Deckgebirge und die über mehrere Jahrzehnte unverfüllte Standzeit der Abbaue eine fortschreitende Entfestigung der Tragelemente, die bisher zu einer Durchbiegung der Südflanke nach Norden von bis zu 5 m geführt hat. Die tragenden Elemente Pfeiler und Schweben wurden so stark beansprucht, dass deren Tragfähigkeitsmaximum überschritten wurde. In der Folge sind die Schweben zum Teil gebrochen oder bereits gefallen, und die Pfeiler befinden sich überwiegend im Bereich der Resttragfähigkeit. Der Lastabtrag erfolgt zunehmend über die Ränder des Baufeldes und über das Deckgebirge an der Südflanke, das seinerseits mit Scherdeformationen und Dilatanz auf die Gebirgsspannungsumlagerung reagiert.

Aufgrund der abgelaufenen Deformationen in der Südflanke ist davon auszugehen, dass sich Auflockerungszonen in der als Schutzschicht wirkenden Steinsalz-Barriere im oberen Bereich der Südflanke und auch im Deckgebirge, speziell im Rötanhydrit (so1A) und in einer begrenzten Zone im Rötquitard (so2-so4), gebildet haben. In der Nachbetriebsphase werden sich diese überbeanspruchten Bereiche höchstens noch begrenzt weiter ausdehnen.

2. In das Grubengebäude tritt seit 1988 eine an Halit und Anhydrit gesättigte Salzlösung zu. Die Zutrittsrate nahm seitdem zwar stufenweise, aber nur langsam zu. Seit 1998 ist die Zutrittsrate weitgehend konstant; die täglich gefasste Menge beträgt zurzeit rund $12,5 \text{ m}^3$. Geologisch-tektonische Erkundungen und deren Bewertung, gebirgsmechanische Analysen und geochemische Untersuchungen führen zu der Schlussfolgerung, dass die dem Grubengebäude an der Südflanke der Schachtanlage Asse zutretende Salzlösung – der einzige Lösungszutritt mit potentieller Bedeutung für die Langzeitsicherheit – sich zum Großteil aus Deckgebirgslösung zusammensetzt und demzufolge über eine oder mehrere Wegsamkeiten durch einen Bereich mit desintegrierter Steinsalz-Barriere aus dem Deckgebirge zutritt [GSF 2006a] [Ercosplan 2003] [Schmidt 2006].

Der Salzlösungszutritt zeigt, dass eine hydraulische Verbindung vom Deckgebirge zum Grubengebäude besteht. Weil die genaue Herkunft und der Weg der Salzlösung in das Grubengebäude nicht bekannt sind, vermutlich auch nicht ermittelt werden können und weil die Steinsalz-Barriere im Bereich der oberen Sohlen bereits gebirgsmechanisch beansprucht ist, muss der gesamte aufgelockerte Bereich der Steinsalz-Schutzschicht um das Grubengebäude als potentieller Migrationspfad angenommen werden. Eine Abdichtung des Zutritts kann nicht erfolgen. Aufgrund der zeitlichen Verlagerungen der Zutrittsorte in das Grubengebäude kann von einer hydraulischen Verbindung zum Deckgebirge oberhalb 574 m Teufe ausgegangen werden. Eine hydraulische Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere in größerer Teufe ist auszuschließen.

Die zutretende, an NaCl und CaSO₄ gesättigte Lösung steht mit dem im Grubengebäude an vielen Stellen aufgeschlossenen Carnallit des Kaliflözes Staßfurt nicht im Gleichgewicht und vermag daher Minerale aus dem Carnallit zu lösen. Es ist davon auszugehen, dass ohne die Realisierung der vorgesehenen technischen Maßnahmen der Salzlösungszutritt in der Nachbetriebsphase unvermindert – eventuell sogar mit wachsender Zutrittsrate – anhalten und den Porenraum im Versatz innerhalb von wenigen 100 Jahren füllen würde. Im Kontakt mit Carnallit fänden dabei Umlösungsprozesse statt, bei denen erhebliche Mengen Gestein zersetzt würden. Die chemisch alterierten bzw. zersetzten Bereiche eines Kaliflözes, die durch die Umlösungen entstehen, besitzen gebirgsmechanisch eine deutlich reduzierte Festigkeit. Umlösungen großen Ausmaßes würden dadurch die Deformationen im Wirtsgestein und im Deckgebirge erheblich verstärken.

Infolge des Lösungszutritts in das Grubengebäude und des – auch im Bereich der Einlagerungskammern – relativ hohen Durchbauungsgrades kann ein Lösungszutritt in die Einlagerungskammern und somit ein Kontakt von Lösung mit den Abfallgebänden nicht vermieden werden.

Zusammenfassend ist als Rahmenbedingungen für die Schachthanlage Asse festzustellen, dass

- ein vollständiger trockener Einschluss der Abfälle nicht möglich ist,
- ein langfristig anhaltender, natürlicher Zutritt von Deckgebirgslösung in der Nachbetriebsphase den sicheren Abschluss der Abfälle von der Biosphäre gefährdet,
- ein Übertritt von Schadstoffen aus den Einlagerungskammern durch das Grubengebäude in das Deckgebirge nicht ausgeschlossen werden kann und
- das Deckgebirge nicht allseits eine geringdurchlässige Barriere darstellt.

Eine Unterbrechung des Transportprozesses ist aufgrund der Ausgangslage somit nicht möglich, das Sicherheitskonzept muss auf eine Verzögerung und Begrenzung von Transportprozessen abzielen.

2.2 Sicherheitskonzept

Ziel des Sicherheitskonzeptes ist, den Transport von Radionukliden aus den Abfallgebänden in die Biosphäre zu verzögern, zu behindern und zu begrenzen. Dies wird erreicht durch:

1. Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebänden

Je weniger Schadstoffe aus den Abfallgebänden mobilisiert werden oder je langsamer die Mobilisierung erfolgt, um so weniger Schadstoffe gelangen (pro Zeiteinheit) in die Porenflüssigkeit, damit ins übrige Grubengebäude, in das Deckgebirge und durch dieses in die Biosphäre. Die Mobilisierung der Schadstoffe wird begrenzt durch

- den Einschluss der Radionuklide im Abfall (z.B. Aktivierungsprodukte im Stahl),
- die Konditionierung der Abfälle (z.B. in einer Zementmatrix),
- die Umschließung von Abfallgebänden mit verlorenen Betonabschirmungen (VBA)².
- das Vermeiden von negativen Einflüssen auf das chemische Milieu in den Einlagerungskammern (z.B. durch Begrenzen des Lösungsaustausches in den Einlagerungskammern mit Strömungsbarrieren)
- das Beeinflussen des chemischen Milieus in den Einlagerungskammern (durch Einbringen von Mg-Depots zur Regulierung des pH-Wertes und Limitierung der Karbonatkonzentration in Lösung).

Die beiden letztgenannten Punkte sind Ziele der technischen Maßnahmen zur Schließung der Schachanlage Asse (vgl. Kapitel 2.3, Schließungskonzept).

2. Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude

Die Lösungsbewegung im Grubengebäude und speziell in den und nahe der Einlagerungskammern ist der primäre Transportprozess für mobilisierte Radionuklide. Die Lösungsbewegung wird eingeschränkt durch

- das Behindern des Lösungsaustausches in den Einlagerungskammern mit Hilfe von Strömungsbarrieren. Aufgrund der langen Standzeit der Grubenbaue haben sich Auflockerungszonen gebildet, so dass ein absoluter Abschluss mit Verschlussbauwerken nicht zu realisieren ist.
- das weitgehende Begrenzen von örtlichen Unterschieden der Lösungsdichte in der Grube, die insbesondere durch Umlöseprozesse von zutretender Lösung an den aufgeschlossenen Carnallitbereichen auftreten würden. Dichteunterschiede führen zu Konvektionsbewegungen der Lösung.
- das Begrenzen von Gasakkumulationen in den Einlagerungskammern, die Lösung verdrängen würden
- die Reduktion der Konvergenzraten, die ebenfalls Lösungsbewegungen innerhalb des Grubengebäudes auslösen (vgl. auch Element 3 des Sicherheitskonzeptes).

Dies sind alles Ziele der technischen Maßnahmen.

3. Begrenzung des Austritts von Lösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge

Je geringer die Rate des Lösungsaustrittes aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge ist, umso niedriger ist die Austrittsrate von mobilisierten und bis zur Austrittsstelle

² Die VBA sind zwar als Transportabschirmungen und nicht zur Förderung der Langzeitsicherheit ausgelegt, verzögern aber gleichwohl die Radionuklidmobilisierung.

in das Deckgebirge transportierten Radionukliden. Sobald das im Grubengebäude gebildete Gas entweichen kann, ist die Konvergenz des Grubengebäudes der wichtigste treibende Prozess für den Lösungsaustritt. Die Konvergenz wird in der Nachbetriebsphase begrenzt durch

- das vollständige Verfüllen der Abbaue der Südflanke mit Salzversatz. Dies führt zu einer Verminderung des Hohlraumvolumens und langfristig zu einer Stabilisierung der Tragelemente und einem Rückgang der Deformationen.
- das Verfüllen aller verbleibenden Hohlräume und das Einbringen eines Schutzfluids in den Porenraum des Versatzes. Der sich rasch im Kontakt mit dem Deckgebirge aufbauende Fluiddruck wird kurzfristig zu einer deutlichen Reduktion der Konvergenz führen. Die Verwendung eines weitgehend an $MgCl_2$ und $MgSO_4$ gesättigten Schutzfluids vermindert die Umlösung am Carnallit und dadurch die Neubildung von Hohlraumvolumen sowie entfestigten Gesteinsbereichen.

Die erstgenannte Maßnahme ist abgeschlossen. Die zweitgenannte Maßnahme ist Teil der technischen Maßnahmen zur Schließung der Schachanlage.

4. Vermeiden des Entstehens direkter Wegsamkeiten zwischen Einlagerungskammern und Deckgebirge

Durch direkte Wegsamkeiten zwischen den Einlagerungskammern und dem Deckgebirge würde die Transportverzögerung im Grubengebäude unwirksam. Das Einbringen des Schutzfluids verringert sowohl die Deformationen im Wirtsgestein als auch Umlöseprozesse im Grubengebäude deutlich. Damit kann das Entstehen von direkten Wegsamkeiten zwischen den Einlagerungskammern und dem Deckgebirge ausgeschlossen werden.

5. Unterbindung eines Lösungsaustritts über die Tagesschächte

Ein nennenswerter Lösungsaustritt über die Tagesschächte könnte die Transportzeit der Radionuklide und die Verdünnung der kontaminierten Lösungen im Deckgebirge deutlich herabsetzen. Dies wird verhindert durch

- den Einbau von Schachtverschlüssen. Diese werden so ausgelegt, dass keine nennenswerten Lösungsmengen über die Tagesschächte aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge austreten können.

6. Mechanischer Schutz des Systems sowie Verzögerung des Schadstofftransportes und Verdünnung durch/im Deckgebirge

Das Deckgebirge schützt das System „Grubengebäude - Wirtsgestein“ und bewirkt eine Verdünnung der ausgepressten kontaminierten Lösung.

Der Transport der Radionuklide durch das Deckgebirge verzögert die Freisetzung in die Biosphäre und dehnt sie zudem in der Zeit aus. Die Bedeutung dieser Prozesse für die Langzeitsicherheit und damit für das Sicherheitskonzept beschreibt qualitativ die vorliegende Szenarienentwicklung für die Geosphäre und quantitativ – allerdings ohne Einfluss der Sorption – die Modellrechnungen zur Ausbreitung von Grubenlösung und Schadstoffen im Deckgebirge [Colenco 2006b].

2.3 Schließungskonzept

Die nachfolgende Darstellung des Schließungskonzeptes gibt einen Überblick über die vorgesehenen Maßnahmen zur Schließung der Schachtanlage Asse II [GSF 2006c]. Vereinzelt Änderungen im Rahmen der Detailplanung sind nicht ausgeschlossen.

Die langzeitige Wirksamkeit des Barrieren-Systems im Nahfeld, insbesondere die Langzeitstabilität der Baustoffe für die geplanten technischen Maßnahmen, setzt voraus, dass diese nicht mit größeren Mengen von Deckgebirgslösungen, die an $MgCl_2$ übersättigt sind, in Kontakt geraten. Diese Voraussetzung schafft als zentrale und zwingende Maßnahme das Einbringen eines Schutzfluids, dessen $MgCl_2$ - und $MgSO_4$ -Konzentrationen bei Gebirgstemperatur nahe dem invarianten Punkt R liegen.

Das Einbringen des Schutzfluids führt bereits während der Betriebsphase zu einer Durchfeuchtung von Tragelementen und des Versatzes. Ohne zusätzliche Maßnahme würde dies kurzzeitig zu erhöhten Verformungsgeschwindigkeiten führen, bis der Fluiddruck in der frühen Nachbetriebsphase etwa hydrostatische Werte erreicht. Daher soll das Tragsystem bei der Einleitung des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle durch das Aufbringen eines pneumatischen Innendrucks im Grubengebäude stabilisiert werden. Das Schließungskonzept und dessen Umsetzung sind so geplant, dass

- unzulässige Auswirkungen auf die Resttragfähigkeit des Tragsystems sowohl in der Betriebs- als auch in der Nachbetriebsphase ausgeschlossen sind,
- keine unerwünschten neuen Wegsamkeiten entstehen (vgl. Element 4 des Sicherheitskonzeptes) und
- die durch das Einleiten des Schutzfluids verursachten Lösungsbewegungen den Transport von Radionukliden nicht entscheidend beschleunigen (vgl. Element 2 des Sicherheitskonzeptes).

Dies wird u.a. dadurch sichergestellt, dass das Schutzfluid von der 775-m- bis zur 725-m-Sohle gezielt und mit relativ niedrigen Einleitraten eingebracht wird. Ab der 700-m-Sohle erfolgt das Einleiten des Schutzfluids erst nach Abdichten der Tagesschächte und Aufbringen eines pneumatischen Stützdrucks im Grubengebäude von 1,0 MPa bis 1,5 MPa, dann aber mit deutlich erhöhter Einletrate [GSF 2006c].

Das Schließungskonzept umfasst die nachfolgend aufgeführten Maßnahmen. Die Auflistung erfolgt geordnet nach der Funktion der Maßnahmen und nicht in der Reihenfolge der Realisierung.

A Verfüllung des Tiefenaufschlusses unterhalb der 775-m-Sohle

Der Tiefenaufschluss unterhalb der 775-m-Sohle wird – abgesehen von wenigen speziellen Verfüllungen in den Tagesschächten – mit Salz und mit Schutzfluid weitgehend parallel verfüllt. Die Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids im Tiefenaufschluss erfüllt Mindestanforderungen, die ausschließen, dass das Schutzfluid im Tiefenaufschluss leichter als jenes auf der 775-m-Sohle und darüber ist und sich dadurch eine dichtebedingte Lösungsbewegung einstellt.

Die Kaverne ist bereits mit befeuchtetem Diabasschotter verfüllt. Für die Verfüllung der Blindschächte 1 und 3a bis 800 m Teufe wird ebenfalls befeuchteter Diabasschotter verwendet (vgl. auch Maßnahmen F und K).

Die Tagesschächte Asse 2 und Asse 4, einschließlich der angeschlagenen Füllörter, werden über die gesamte Erstreckung im Grubengebäude, vom Schachtfuß bzw. vom

Kavernenhals bis zu den Schachtverschlüssen, mit einer setzungsstabilen Sorelbetonsäule verfüllt (vgl. Maßnahme K).

B Bau von Strömungsbarrieren im Nahbereich der LAW-Einlagerungskammern

Die Strömungsbarrieren trennen die Einlagerungskammern sählig, teilweise auch vertikal, vom übrigen Grubengebäude; sie behindern die Lösungsbewegung zwischen den Einlagerungskammern und benachbarten Grubenbauen und den Lösungsaustausch im Poren- und Zwickelhohlraum der Einlagerungskammern. Aufgrund der Aufschlussverhältnisse, der Befahrbarkeit der Auffahrungen und des relativ hohen Durchbaugrades im Nahbereich werden die Einlagerungskammern auf der 750-m- und 725-m-Sohle in fünf Einlagerungsbereiche LAW1A, LAW1B, LAW2, LAW3 und LAW4 zusammengefasst [Colenco 2006c]. Die Einlagerungsbereiche sind jeweils gegeneinander und gegen das übrige Grubengebäude durch Strömungsbarrieren abgetrennt (Ausnahme: keine Strömungsbarrieren zwischen LAW1A und LAW1B). Der Lösungsaustausch zwischen den Einlagerungskammern innerhalb eines Einlagerungsbereiches wird nicht durch Strömungsbarrieren behindert und kann relativ frei erfolgen.

Neben den Strömungsbarrieren zur Behinderung des Lösungsaustausches in den Einlagerungsbereichen werden weitere Grubenbaue mit Strömungsbarrieren versehen, um unerwünschte hydraulische Verbindungen zu vermeiden und um die Lösungsbewegung im Grubengebäude möglichst an den Einlagerungsbereichen vorbei zu lenken. Beispiele für solche Strömungsbarrieren sind:

- Erkundungsstrecke aus Abbau 3/750 (Na3) nach Süden, um das Entstehen eines hydraulischen Kontaktes zum Deckgebirge infolge Subrosion an der Flanke zu vermeiden
- Blindschächte 1 und 2 zwischen der 800-m- und der 700-m-Sohle
- Blindschacht 3 und Gesenk vor der Einlagerungskammer 1/750 zwischen der 750-m- und der 700-m-Sohle
- Hauptquerschlag nach Süden auf der 750-m-Sohle zur Trennung der Einlagerungsbereiche im Jüngeren Steinsalz von den Grubenbauen im Älteren Steinsalz
- ausgewählte Strecken und Streckenbereiche zwischen den Grubenbauen im Älteren Steinsalz der 750-m-Sohle und dem Carnallitit-Baufeld
- Hauptgesenk 1 östlich zwischen der 725-m- und der 700-m-Sohle

Die allgemeinen Anforderungen an die Strömungsbarrieren und deren Einbauorte sind in [GSF 2006c] beschrieben. Die prinzipielle Anordnung der Einbauorte wurde aufgrund von Modellrechnungen zur Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude festgelegt [Colenco 2005b]. Die Strömungsbarrieren im Nahbereich der LAW-Einlagerungskammern befinden sich zwischen der 800-m- und der 700-m-Sohle und liegen vorwiegend im anstehenden Steinsalz, zum Teil auch im Carnallitit.

Das technische Konzept zum Bau der Strömungsbarrieren liegt vor, es beruht auf den Erfahrungen aus dem Bau einer Pilotströmungsbarriere [GSF 2005a]. Das dichtende Element der Strömungsbarrieren, die Kernbarriere, besteht aus Sorelbeton. Zur Einspannung dieser Bauwerke während des Betonierens und in der Nachbetriebsphase werden beidseitig Widerlager errichtet, die ebenfalls aus Sorelbeton bestehen. Für eine hinreichende gebirgsmechanische Stabilisierung der Einbauorte und eine Verhinderung von Umläufigkeiten der Kernbarrieren wird in angrenzende Grubenbereiche stützender Versatz aus Sorelbeton oder –mörtel eingebracht.

Für die Szenarienentwicklung kann unterstellt werden, dass Strömungsbarrieren die Lösungsbewegung entlang der entsprechend verfüllten Grubenbaue deutlich verringern und dass die Bauwerke langzeitstabil sind. Nur im Sinne von Störfällen ist eine reduzierte Wirksamkeit einzelner Strömungsbarrieren anzunehmen.

C Resthohlraumverfüllung in den LAW-Einlagerungsbereichen

Die Einlagerungskammern auf der 750-m- und 725-m-Sohle sind nicht alle vollständig mit Abfallgebinden und Salzhautwerk verfüllt. Die noch unverfüllten Resthohlräume werden über Bohrungen weitestgehend mit chemisch wirksamen Mg-Depots (Brucit-Granulat) verfüllt. Die kammerspezifischen Verfüllkonzepte liegen vor [GSF 2006b]. Sie orientieren sich an den Zielen der Beeinflussung des chemischen Milieus in den Einlagerungskammern und der gebirgsmechanischen Stützwirkung. In die verbleibenden Poren- und Zwickelhohlräume der Einlagerungskammern und der übrigen Grubenbaue der Einlagerungsbereiche wird ein Schutzfluid eingeleitet, das zusätzlich mit Brucit zu einer Suspension angereichert ist (etwa 5 g Brucit pro Liter Schutzfluid).

Die Bohrungen, die für die Umsetzung der Verfüllmaßnahmen abgeteuft werden, werden mit Sorelbeton bzw. Sorelmörtel dicht verschlossen.

Die Rolllöcher 1 und 2 sowie das Gesenk im Bereich der ELK 10/750 (LAW2) werden mit Sorelbeton verfüllt. Gleiches gilt für die Rolllöcher 3, 4 und 5 (LAW3). Die nördlich der Einlagerungskammern im Jüngeren Steinsalz verlaufenden Richtstrecken, in die auch die o.g. Rolllöcher stoßen, sowie die die Einlagerungsbereiche im Älteren Steinsalz (LAW1A und LAW1B) umfahrende Wendelstrecke werden – soweit nicht mit Strömungsbarrieren versehen – vollständig mit stützendem Versatz aus Sorelbeton verfüllt.

Der bereits eingebrachte Eigenversatz im Abbau 9/750 (LAW2) wird planiert, mit Sorelbeton abgedeckt und mit Sorelmörtel nachinjiziert. Der ca. 4 m mächtige obere Bereich des Abbaus vor den Durchhieben im Firstniveau zu den benachbarten ELK 10/750 und 8/750 wird mit Brucit-Granulat bzw. –mörtel verfüllt. Der Sorelbeton im Abbau 9/750 behindert die Konvergenz, nicht jedoch das Entweichen von Gas und Lösung aus den benachbarten Einlagerungskammern durch den Abbau 9/750 und über die Rolllöcher in der Firste zur 725-m-Sohle. Im Gegensatz zu den Rolllöchern, die in Einlagerungskammern führen, werden die Rolllöcher in der Firste des Abbaus 9/750 nicht mit Sorelbeton verfüllt.

Das Einbringen des Mg-Depots in die Einlagerungskammern erfolgt erst, nachdem die Strömungsbarrieren um den jeweiligen ELB gebaut sind.

D Resthohlraumverfüllung im Carnallitit-Baufeld

Die Grubenbaue des Carnallitit-Baufeldes wurden bereits in den 20er Jahren mit den Rückständen aus der Kali-Aufbereitung verfüllt. Dieser Altversatz aus der Gewinnungsphase ist heute deutlich kompaktiert und wirkt bereits tragend. Noch geringe unverfüllte Resthohlräume in den Firstbereichen der Abbaue werden derzeit mit Salzhautwerk von Auffahrungen oder mit Blasversatz verfüllt.

Die Druckentlastung des Tiefenaufschlusses und der Abbaue im Älteren Steinsalz nördlich des ELB LAW3 wird über das Carnallitit-Baufeld geführt (s.u.). Um die Lösungsbewegung in der Umgebung der Einlagerungsbereiche nicht negativ zu beein-

flussen, werden gewisse Strecken zwischen den Grubenbauen im Älteren Steinsalz und dem Carnallitit-Baufeld mit Strömungsbarrieren versehen (vgl. Maßnahme B).

Der westliche Blindschacht verbindet die 800-m-Sohle – und damit den Tiefenaufschluss – mit dem Carnallitit-Baufeld in 750 m Teufe. Er wird mit befeuchtetem Magnesitschotter verfüllt, um die durch Konvergenz aus dem Tiefenaufschluss gepresste Lösung, entfernt von den Einlagerungsbereichen, zur 700-m-Sohle abzuleiten (vgl. Maßnahme F). Von der 750-m-Sohle erfolgt die Druckentlastung über die nahe gelegenen Kammern 5 und 6 im westlichen Carnallitit-Baufeld und das nahe Hauptgesenk I westlich bis in den Firstbereich des Carnallitit-Baufeldes und von dort – aus den Kammern 1 und 2 (West) – über eine ebenfalls mit Magnesitschotter verfüllte Strecke auf der 700-m-Sohle zum Baufeld in der Südflanke.

Der Fluiddruck der Abbaue im Älteren Steinsalz wird über eine mit Magnesitschotter verfüllte Strecke auf der 725-m-Sohle entlastet, die den Firstbereich von Abbau 4/750Na2 mit den Kammern 4 und 3 (Ost) im Carnallitit-Baufeld verbindet. Eine hoch durchlässige Verbindung zwischen der 775-m und 750-m-Sohle besteht über das Rollloch in der Firste von Abbau 4/775, das ebenfalls mit Magnesitschotter verfüllt wird.

Das Schutzfluid wird in das Carnallitit-Baufeld koordiniert mit jenem in die übrigen Grubenbaue der 750-m- und 725-m-Sohle eingeleitet.

E Verfüllen der übrigen Grubenbaue zwischen der 800-m- und der 700-m-Sohle

Die Grubenbaue zwischen der 800-m- und der 700-m-Sohle sind teilweise mit Eigenversatz aus der Auffahrung des Tiefenaufschlusses verfüllt. In unversetzte Grubenbaue und Resthohlräume wird, soweit diese nicht von den Maßnahmen B bis D betroffen sind, überwiegend stützender Versatz aus Sorelbeton sowie in geringerem Umfang Salzversatz eingebaut.

Die unverfüllten Resthohlräume von Abbau 3/750 werden teilweise mit stützendem Versatz aus Sorelbeton verfüllt. Dieser reicht im Westen, vor den Strömungsbarrieren gegen den ELB LAW2 und jener in der Erkundungsstrecke nach Süden (vgl. Maßnahme B) bis zur Firste, im Osten des Abbaus, vor dem Durchhieb im Firstniveau zur ELK 5/750 des ELB LAW3, nur bis etwa 2/3 der Kammerhöhe. Der verbleibende Hohlraum wird mit Brucit-Granulat bzw. -mörtel verfüllt. Der Sorelbeton behindert damit die Konvergenz, nicht jedoch das Entweichen von Gas und Lösung aus dem ELB LAW3.

In die verbleibenden Poren- und Zwickelhohlräume des gesamten Nahbereiches der Einlagerungskammern von der 775-m- bis einschließlich der 700-m-Sohle wird ein Schutzfluid eingeleitet, das mit Brucit angereichert ist. In die Einlagerungsbereiche, das Carnallitit-Baufeld und die übrigen Grubenbaue zwischen der 800-m- und der 700-m-Sohle wird das Schutzfluid derart eingeleitet, dass unnötig große Druckunterschiede an den Strömungsbarrieren ausbleiben (vgl. Maßnahme L).

F Verfüllen von Blindschächten, Rolllöchern u.ä.

Grundsätzlich werden alle vertikalen Auffahrungen zwischen den Sohlen mit Sorelbeton bzw. -mörtel dicht verschlossen. Ausnahmen bilden die wenigen oben genannten Auffahrungen, die mit Magnesitschotter verfüllt werden.

Das Verfüllen von einzelnen Blindschächten und Rolllöchern wurde bereits im Zusammenhang mit den Maßnahmen B bis D angesprochen. Die folgende Zusammenstellung

fasst die Sondermaßnahmen zum Verfüllen von Blindschächten, Rolllöchern und anderen Verbindungen zwischen mehreren Sohlen zusammen. Die vertikalen Auffahrungen in die Einlagerungsbereiche sind abschließend in C beschrieben und werden hier nicht wiederholt.

Grubenbau	Teufenerstreckung [Sohlen]	Verfüllung	
		von ... bis	Verfüllmaterial
Blindschacht 1	574 – 975	975 – 800 800 – 574	Schotter Sorelbeton
Blindschacht 2	553 – 800	800 – 553	Sorelbeton
Blindschacht 2a	490 – 553	553 – 490	Sorelbeton
Blindschacht 3	490 – 750	750 – 490	Sorelbeton
Blindschacht 3a	750 – 925	925 – 800 800 – 750	Schotter Sorelbeton
Blindschacht 4	750 – 850	850 – 750	Sorelbeton
westl. Blindschacht	750 – 800	800 – 750	Schotter
Hauptgesenk I westl.	700 – 750	750 – 700	Schotter
Hauptgesenk Ia westl.	725 – 750	750 – 725	Salzversatz
Hauptgesenk I östl.	700 – 750	750 – 700	Sorelbeton
Gesenk von K 1/750	700 – 750	750 – 700	Sorelbeton
Wendelstrecke	490 – 975	975 – 800 800 – 490	Salzversatz Sorelbeton
Rolllöcher und Gesenk von Kammern 1a-c/775, 4/775 und 5/775	750 – 775	775 – 750	4/775 Schotter, sonst Sorelbeton

Verfüllmaterial:

Schotter unterhalb der 800-m-Sohle: befeuchteter Diabasschotter
oberhalb der 800-m-Sohle: befeuchteter Magnesitschotter

Sorelbeton Strömungsbarriere

Salzversatz trocken eingebrachtes Salzhaufwerk

Alle Bohrungen, die Sohlen zwischen 800 m und 700 m Teufe untereinander oder mit darüber liegenden Sohlen des Abbaufeldes in der Südflanke verbinden, werden mit Sorelbeton oder Sorelmörtel verfüllt.

G Maßnahmen im Bereich der MAW-Einlagerungskammer

Zur MAW-Kammer 8a auf der 511-m-Sohle bestehen vertikale Verbindungen über Bohrungen aus der darüber liegenden Beschickungskammer auf der 490-m-Sohle sowie eine horizontale Verbindungsstrecke aus dem Abbau 8/511. Die Verbindungsstrecke ist mit einem Betonkörper versehen, der jedoch im Kontakt mit Schutzfluid korrodieren wird.

Die Beschickungsbohrungen sind unverfüllt. Über diese Bohrungen wird die MAW-Einlagerungskammer verfüllt. Zuerst wird der Ringraum zwischen dem Fasskegel und den Stößen bis auf Firsthöhe der o.g. Verbindungsstrecke zum Abbau 8/511 mit Sorelbeton verfüllt. Danach wird die Oberfläche des Fasskegels mit einer geringmächtigen Schicht Brucit-Granulat abgedeckt. Anschließend wird der verbleibende Resthohlraum mit stützendem Versatz aus Sorelbeton vollständig verfüllt. Der Sorelbeton wird also derart eingebracht, dass dieser allseitig eine mehrere Meter dicke Barriere zwischen dem Fasskegel und den Kammerstößen bildet. Abschließend wird die Kontur an den Stößen und in der Firste im erforderlichen Umfang mit Sorelmörtel injiziert.

Die Beschickungsbohrlöcher, die Beschickungskammer und deren Zugangsstrecke auf der 490-m-Sohle sowie das Rolloch und die Bohrungen, die nördlich der MAW-Kammer direkt von der 490-m-Sohle in den Abbau 8a/532 führen, werden ebenfalls mit Sorelbeton verfüllt.

Die vollständige Verfüllung des unverfüllten Hohlraums der MAW-Kammer und der Auf-fahrungen oberhalb der MAW-Kammer mit Sorelbeton verhindert das Austreten von Lösung und von Gas aus der MAW-Kammer in die Abbaue der 511-m- und der 490-m-Sohle. Der Sorelbeton wirkt zudem stark stützend und behindert die Konvergenz der MAW-Kammer praktisch vollständig.

Die Sohle der MAW-Kammer wird aufgrund gebirgsmechanischer Beanspruchung als aufgelockert und somit als hydraulisch wegsam beurteilt. Der Firstspalt des mit Salzhautwerk verfüllten Abbaus 8a auf der 532-m-Sohle, der unterhalb der MAW-Kammer liegt, wurde vor einiger Zeit mit Anneliese-Zement mit CaO-Bindemittel versetzt. Dieser ist im Kontakt mit dem Schutzfluid chemisch unbeständig. Zudem hat sich zwischen dieser älteren Verfüllung und der Firste wieder ein Spalt gebildet. Um einen eventuellen Radionuklidtransport über die aufgelockerte Sohle der MAW-Kammer und durch die Abbaue 8a und 8b auf der 532-m-Sohle in das Baufeld in der Südflanke zu verzögern, werden die Durchhiebe im Firstniveau zwischen den letztgenannten Abbauen und den Abbauen 7b und 9a der 532-m-Sohle mit Strömungsbarrieren versehen. Im Zusammenhang mit der Erstellung dieser Strömungsbarrieren wie auch der Verfüllung des Rollochs und der Bohrungen zur 490-m-Sohle wird Sorelbeton in die heute noch bestehenden Hohlräume im Nordteil der Firste der Abbaue 8a/532 und 8b/532 eingebracht. Dieser dringt jedoch höchstens im Dezimeter-Bereich in den bestehenden Salzversatz ein.

Vom Abbau 8a/532 führen ein Durchhieb im Sohlenniveau sowie vom Abbau 8b/532 je ein Durchhieb im Sohlen- und im Firstniveau zum Abbau 8/532. Der Durchhieb im Firstniveau wird mit einer Strömungsbarriere verschlossen. Die beiden Durchhiebe im Sohlenniveau sind mit Salzversatz verfüllt.

In die MAW-Kammer und in die beiden Abbaue 8a und 8b auf der 532-m-Sohle wird kein Schutzfluid gezielt eingeleitet (Maßnahme L).

H Verfüllung des Baufeldes in der Südflanke oberhalb der 725-m-Sohle

Die Abbaue sind bis auf geringe Resthohlräume (Blasschatten) vollständig mit Salz verfüllt, sei es durch Salzgrus aus der Auffahrung des Tiefenaufschlusses (Eigenversatz) oder durch Salz der Halde Ronnenberg (Fremdversatz) (vgl. [Colenco 2006c]).

Die Wendelstrecke, die Blindschächte sowie die derzeit noch nicht verfüllten Abbaubegleitstrecken und Infrastrukturbereiche auf der 490-m-Sohle werden mit Sorelbeton

verfüllt. Gleiches gilt für die Bohrungen, über die das Schutzfluid eingeleitet wird (vgl. Maßnahme L).

Durch die geochemische Zusammensetzung des Schutzfluids nahe des invarianten Punktes R und der zusätzlichen hochwertigen Verfüllung mit Sorelbeton der Abbaubegleitstrecke und der Wendelstrecke, den einzigen Carnallitauflösungen im Baufeld in der Südflanke, besteht im Baufeld kein nennenswertes Potential für Umlösungen, die zu Veränderungen der Lösungsdichte und dadurch zu konvektiven Lösungsbewegungen führen könnten.

I Bohrungen durch die Steinsalz-Schutzschicht zu Anhydritschichten und zum Deckgebirge

Bohrungen, die aus dem Grubengebäude heraus den Rötanhydrit (so1A) in der Südflanke oder die ausgedehnten Anhydrite der Leine- und Aller-Serie in der Nordflanke durchörtern, wurden nach ihrer Erstellung vollständig und qualifiziert mit Magnesiamörtel verfüllt (vgl. Kapitel 5.1.3.5). Weitere technische Maßnahmen zur Abdichtung dieser Bohrungen sind nicht erforderlich.

Die Tiefbohrung Remlingen 1 durchörtert von über Tage her das Deckgebirge und die Steinsalz-Schutzschicht. Sie reicht bis in eine Teufe von 689 m und verläuft im Bereich des Grubengebäudes im Pfeiler 5/6 des Abbaufeldes in der Südflanke. Schon während der Gewinnungsphase wurde diese Bohrung ordnungsgemäß dicht verfüllt; auf der 595-m-Sohle wurde sie in der Folgezeit angefahren und trocken vorgefunden. Weitere Angaben enthält ebenfalls Kapitel 5.1.3.5.

J Verfüllen von Bohrungen und Grubenbauen, welche für die Realisierung der Schließungsmaßnahmen erstellt wurden

Für die Realisierung der Schließungsmaßnahmen müssen neue Auffahrungen und Bohrungen erstellt werden. Soweit diese neuen Auffahrungen und Bohrungen zwischen der 800-m- und der 700-m-Sohle verlaufen oder diese Sohlen anschneiden, werden sie nach der Nutzung hochwertig mit Sorelbeton oder Sorelmörtel verfüllt bzw. verpresst.

K Verfüllen der Kaverne und der Tagesschächte

Die Kaverne unterhalb des Schachtes 4 wurde mit Diabasschotter verfüllt (vgl. Maßnahme A). Beide Tagesschächte werden, vom Tiefsten beginnend, abschnittsweise mit Sorelbeton bis zum Firstniveau der angeschlagenen Strecken auf der 490-m-Sohle verfüllt. Darüber werden die Dichtelemente eingebracht.

Die Tagesschächte werden im intakten Jüngeren Steinsalz oberhalb der 490-m-Sohle mit je einem temporären Dichtelement und darüber einem Hauptdichtelement nach dem Stand von Wissenschaft und Technik versehen, nachdem die Auflockerungszonen im erforderlichen Umfang gespitzt worden sind. Das Hauptdichtelement ist mehrteilig und besteht im Wesentlichen von unten nach oben aus ca. 30 m Sorelbeton, anschließend ca. 10 m Salztone und darüber ca. 10 m Bentonit. Der Bentonit verhindert den Kontakt von $MgCl_2$ -armen Salzlösungen aus dem Deckgebirge mit Sorelbeton.

Um frühzeitig eine ausreichende Gasdichtheit für das Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks im Grubengebäude (vgl. Maßnahme L) zu gewährleisten, wird vorerst – nach Ausführen aller untertägigen Arbeiten und dem Einleiten des Schutzfluids bis zur

700-m-Sohle – ein 8 m langes temporäres Dichtelement aus Sorelbeton mit einem Kern aus Straßenbaubitumen in jeden der beiden Tagesschächte eingebaut. Die Position der temporären Dichtelemente ist jeweils unmittelbar unterhalb jener des entsprechenden Hauptdichtelements, im Schacht 2 von 478 m bis 470 m Teufe und im Schacht 4 von 474 m bis 466 m Teufe [DBETec 2006a]. Die Zuleitungen für das Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks und für das Einleiten des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle (vgl. Maßnahme L) werden durch das temporäre Dichtelement von Schacht 4 geführt.

Das Hauptdichtelement in Schacht Asse 2 wird unmittelbar nach dem Einbau der temporären Dichtelemente eingebaut, jenes in Schacht Asse 4 nach Abschluss des Einleitens von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke, Abdichten der Zuleitungen mit Packern und Kappen der Zuleitungen (vgl. Maßnahme L).

Für die Szenarienentwicklung kann davon ausgegangen werden, dass diese Verschlussbauwerke langzeitstabil sind und dass keine nennenswerten Mengen kontaminierter Lösung aus dem Grubengebäude entlang der Tagesschächte ins Hutgestein und Deckgebirge austreten können.

L Einbringen des Schutzfluids

Das Einbringen des Schutzfluids in die Grubenbaue der Schachanlage Asse erfolgt in drei Phasen (Anlage 2 in [GSF 2006c])

- (1) Tiefenaufschluss bis einschließlich der 800-m-Sohle
- (2) 775-m-Sohle bis einschließlich der 700-m-Sohle
- (3) oberhalb der 700-m-Sohle

Wie bereits in Abschnitt A ausgeführt, ist das Schutzfluid im Tiefenaufschluss eine MgCl_2 -reiche Lösung mit höherer Dichte als jene des Schutzfluids auf der 775-m-Sohle und darüber. Oberhalb des Tiefenaufschlusses wird ein Schutzfluid eingebracht, dessen MgCl_2 - und MgSO_4 -Konzentrationen bei Gebirgstemperatur nahe des invarianten Punktes R liegen. Dabei weist das Schutzfluid, welches zwischen der 775-m-Sohle und der 700-m-Sohle eingeleitet wird, eine relativ enge Bandbreite der Zusammensetzung auf. Zusätzlich wird es mit Brucit zu einer Suspension angereichert (≥ 5 g/l). Die Zusammensetzung des Schutzfluids darf oberhalb der 700-m-Sohle in einer breiteren Bandbreite variieren (Anlage 2 zu [GSF 2006c]).

Während der Phasen (1) und (2) sind die Einbringraten relativ gering. Auf der 750-m- und der 725-m-Sohle wird das Schutzfluid in mehrere separate, durch Strömungsbarrieren getrennte Grubenbereiche eingeleitet. Durch abgestimmtes Einleiten in die verschiedenen Bereiche werden unnötig hohe Druckunterschiede und damit Lösungsbewegungen während des Einleitens vermieden.

Bis zum Flutungsniveau von 685 m Teufe, d.h. bis über die Firste der 700-m-Sohle, wird das Schutzfluid von unter Tage, d.h. bei offenen Tagesschächten eingebracht. Der Luftdruck oberhalb des Schutzfluidpegels beträgt während dieser Phase des Einleitens somit 0,1 MPa.

Um die Gebirgsverformungen während des Einleitens von Schutzfluid oberhalb der 700-m-Sohle zu begrenzen, wird in der letzten Phase des Schutzfluid-Einleitens das Grubengebäude mit einem pneumatischen Innendruck von 1,0 MPa bis 1,5 MPa gestützt. Dazu wird das Einleiten von Schutzfluid beim Flutungsniveau von 685 m Teufe unterbrochen und in den beiden Tagesschächten die temporären Dichtelemente ein-

gebaut (vgl. Maßnahme K). Anschließend wird der pneumatische Druck über die dafür vorgesehenen Einleitbohrungen oder Durchleitungen aufgebracht. Nachdem der pneumatische Druck die genannte Bandbreite erreicht hat, beginnt die letzte Phase des Einleitens von Schutzfluid. Dieses erfolgt nun zügig und mit hoher Einletrate über verrohrte Bohrungen, die von der Oberkante des temporären Dichtelements in ausgewählte Abbaue auf unterschiedlichen Sohlen abgeteuft werden. Durch einen sequenziellen Einsatz der Bohrungen dringt das Schutzfluid bereichsweise von unten in das Baufeld in der Südflanke ein, wodurch eine vorlaufende Durchfeuchtung der Tragelemente und die Bildung von vertikalen Abrasionskanälen vermieden werden. Der pneumatische Druck oberhalb des ansteigenden Schutzfluidpegels wird dabei innerhalb der vorgegebenen Bandbreite gehalten. Das Einleiten von Schutzfluid endet, wenn eine möglichst vollständige Füllung des Grubengebäudes mit Schutzfluid erreicht ist. Als Kriterium hierfür muss der messtechnisch erfasste Fluiddruck mindestens einem Lösungspegel von 490 m Teufe entsprechen.

Nach Abschluss des Einleitens von Schutzfluid werden die Bohrungen mit Sorelbeton verfüllt, die Durchleitungen durch das temporäre Dichtelement im Schacht Asse 4 unter Aufrechterhaltung des pneumatischen Drucks oberhalb des Schutzfluidpegels mit Packern abgedichtet und die Zuleitungen gekappt. Abschließend wird das Hauptdichtelement des Schachtes Asse 4 eingebaut.

Die der Schachtanlage über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke zutretende Lösung aus dem Deckgebirge wird bis zur Unterbrechung der Schutzfluideinleitung oberhalb der 700-m-Sohle gefasst und abgeleitet.

Exemplar für BMBWF (BMBWF)

3 Methodik der Szenarientwicklung

Die Szenarientwicklung für den Standort Asse erfolgt mit der Methodik von PROSA [Prij 1993] [Grupa 1999]. Diese beruht auf einer ein-eindeutigen Zuordnung zwischen einem Szenario und der qualitativen Wirkungsweise des Multibarrierensystems (MBS) des betrachteten Systems am konkreten Standort. Szenarien unterscheiden sich nach dieser Methodik durch die qualitative Wirkungsweise des MBS, indem z.B. die Wirkung einer Barriere ausfällt oder in einer Barriere ein advektiver anstelle rein diffusiven Transportprozesses stattfindet. In der Literatur zur PROSA-Methodik wird der Begriff „Szenario“ für mehrere ähnliche mögliche Entwicklungen des Systems verwendet („a set of look-alike features“). Nach der in Deutschland gebräuchlichen Terminologie entspricht dies einer Szenariengruppe. Im Folgenden wird deshalb der Begriff „Szenariengruppe“ anstelle des in der PROSA-Literatur verwendeten Begriffs „Szenario“ verwendet. Der Begriff „Szenario“ bezeichnet nachfolgend eine konkrete mögliche Entwicklung.

Die nachfolgend entwickelten Szenariengruppen führen alle zu einem früheren oder späteren Übertritt von Radionukliden³ aus dem Grubengebäude in die Geosphäre und durch diese in die Biosphäre, d.h. sie unterstellen durchwegs einen Transport von Radionukliden durch das gesamte MBS. Mögliche Entwicklungen des Gesamtsystems, bei denen es zu keiner Radionuklidfreisetzung kommt, werden mit der Methodik nicht erfasst. In diesem Sinne ist die Szenarientwicklung einseitig, sie beschränkt sich auf die ungünstigen möglichen Entwicklungen des Systems.

Die qualitative Wirkungsweise des MBS – und damit die Charakterisierung von Szenariengruppen – wird durch die Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse (FEP) bestimmt, welche bei einer möglichen Systementwicklung zur Radionuklidfreisetzung führen oder diese beeinflussen. Eine Szenariengruppe wird somit gegen andere durch die Festlegung abgegrenzt, welche FEP als wirksam bzw. auslösend unterstellt und welche FEP als unwirksam bzw. nicht eintretend angenommen werden. Entwicklungen, bei denen einer der letztgenannten FEP wirksam ist, gehören einer anderen Szenariengruppe an.

Die Szenarientwicklung nach PROSA basiert auf einer standortspezifischen Liste der möglicherweise relevanten FEP (FEP-Liste). Diese wird in einem ersten Schritt gestützt auf eine ausführliche Beschreibung des Systems erstellt (Kapitel 5). In der Literatur veröffentlichte FEP-Listen ermöglichen anschließend eine Überprüfung auf Vollständigkeit. Die hier beigezogenen Listen sind die wirtsgesteinsunabhängige Liste der NEA [OECD 2000], die generische Liste für Standorte im Salzgestein von PROSA [Prij 1993] und die standortspezifische Liste des Standortes WIPP [USDOE 1996].

Nach PROSA werden die FEP entsprechend der Art ihres Einflusses auf die Radionuklidfreisetzung in die folgenden vier Kategorien unterteilt:

- Transport-FEP: beschreiben qualitativ den Radionuklidtransport innerhalb oder durch ein Teilsystem oder ein Kompartiment des Multibarrierensystems.

³ In diesem Bericht schließt eine Aussage zu Radionukliden eine analoge Aussage zu chemotoxischen Schadstoffen ein, außer natürlich in Verbindung mit radioaktivem Zerfall und der Berechnung von Strahlenexpositionen.

- Primär-FEP: umfassen die grundlegenden Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse, welche den Radionuklidtransport verursachen oder eine Randbedingung bilden (Ursachen von und Randbedingungen für Transport-FEP). Dazu gehören z.B. auch die Geometrie des Grubengebäudes und das Radionuklidinventar.
- Variant-FEP: beschreiben in quantitativer Weise die Raten von Transport-FEP bzw. die Größen oder Raten von Primär-FEP.
- Übriger-FEP: umfassen die in der Szenariengruppe nicht unterstellten FEP:
 - relevante FEP, deren Eintreten in dieser Szenariengruppe ausgeschlossen, in einer anderen Szenariengruppe jedoch als Primär- oder Transport-FEP unterstellt werden
 - extrem unwahrscheinliche FEP, die in keiner Szenariengruppe unterstellt werden
 - FEP mit vernachlässigbaren Auswirkungen bei jeder Entwicklung des Systems

Der Prozess der Szenarientwicklung nach PROSA ist iterativ. Den Ausgangspunkt bildet eine Gruppe wahrscheinlicher, ähnlicher Entwicklungen des Systems. Diese Systementwicklungen beruhen auf einheitlichen Annahmen zum Eintreten bzw. Nicht-Eintreten von FEP. Sie sind so zu wählen, dass sie eine Szenariengruppe bilden (Basis-Szenariengruppe), d.h. dass das MBS bei allen Systementwicklungen eine qualitativ einheitliche Wirkungsweise besitzt. Ansonsten kann die Basis-Szenariengruppe frei festgelegt werden; die PROSA-Methodik sichert eine abdeckende Identifikation der weiteren Szenariengruppen.

Ein Iterationsschritt beginnt – basierend auf einer Beschreibung der Systementwicklungen gemäß der betrachteten Szenariengruppe und der Wirkungsweise des MBS – mit der Zuweisung aller FEP der standortspezifischen FEP-Liste zu den oben genannten vier Kategorien. Die Zuweisung ist damit spezifisch für die Szenariengruppe. Anschließend werden die der Kategorie „Übriger-FEP“ zugewiesenen FEP dahingehend überprüft, ob ihr Einbezug in die Szenariengruppe, d.h. das Unterstellen ihres Eintretens, die qualitative Wirkungsweise des MBS verändern würde. Ist dies nicht der Fall, wird die Szenariengruppe durch Einbezug des betreffenden FEP erweitert und der FEP in die entsprechende Kategorie „Primär-FEP“ oder „Transport-FEP“ verschoben.

Zum Abschluss des Iterationsschrittes wird aus der Kategorie „Übriger-FEP“ ein relevanter, möglicherweise eintretender FEP ausgewählt und basierend darauf eine neue Szenariengruppe definiert, bei der dieser FEP – im Gegensatz zur vorangehenden Szenariengruppe – eintritt und somit Primär- oder Transport-FEP ist. Gleichzeitig kann – oder muss sogar – das Eintreten von bislang als Primär- oder Transport-FEP eingestuft FEP ausgeschlossen werden.

Nach der Festlegung der zweiten Szenariengruppe beginnt der zweite Iterationsschritt wiederum mit der Zuweisung der FEP zu den vier Kategorien, diesmal für die zweite Szenariengruppe. Sukzessive und iterativ werden durch „Aktivieren“ von Übrigen-FEP weitere Szenariengruppen definiert, bis die mögliche künftige Entwicklung des Systems abdeckend beschrieben ist.

Der Prozess der Szenarientwicklung nach PROSA beschreibt sich damit stichwortartig wie folgt:

0. Festlegen und Beschreiben einer Gruppe ähnlicher, möglicher Entwicklungen (initiale Szenariengruppe oder Basis-Szenariengruppe)
1. Zuweisen aller standortspezifischen FEP zu einer der Kategorien „Primär-FEP“, „Transport-FEP“, „Variant-FEP“ und „Übriger-FEP“
2. Überprüfen der Übrigen-FEP, ob ein Einbezug in die Szenariengruppe die Wirkungsweise des MBS qualitativ ändern würde
3. ggf. Erweitern der Szenariengruppe und Anpassen der FEP-Kategorisierung
4. Definition und Beschreiben einer neuen Szenariengruppe durch Annahme des Eintretens eines bislang ausgeschlossenen relevanten Übrigen-FEP
5. Neubeginn bei Punkt 1 (Iterationsprozess)

Zur Erleichterung des Vorgehens werden die FEP einem Kompartiment des MBS zugewiesen und mit einer Nummer gekennzeichnet. Die Nummer besteht aus einer durch Punkte unterteilten Folge von ein- und zweistelligen Zahlen. Die erste Zahl ist immer zweistellig und bezeichnet das Kompartiment des MBS, in dem der FEP wirkt. Die Gliederung des MBS ist in Kapitel 4 beschrieben; sie wird hier nur so weit dargelegt, dass das Konzept der FEP-Nummerierung erläutert werden kann. Die erste Ziffer der ersten Zahl der FEP-Nummer ist jene des betroffenen Teilsystems:

- 1 = Nahfeld
- 2 = Hutgestein und Deckgebirge (Fernfeld)
- 3 = Biosphäre

Die zweite Ziffer der ersten Zahl der FEP-Nummer bezeichnet das betroffene Kompartiment im Teilsystem des MBS:

- 11 = Abfall, Matrix, Behälter
- 12 = Einlagerungsbereich
usw. (vgl. Kapitel 4)

Soll das gesamte Teilsystem ohne eine weitere Unterteilung benannt werden, wird dies mit der Kompartimentennummer 0 ausgedrückt:

- 10 = gesamtes Teilsystem Nahfeld, ungegliedert

Primär-FEP werden durch die Nummer des Kompartiments, in der sie wirken, gefolgt von einer fortlaufenden Ordnungszahl bezeichnet. Die Nummern der Primär-FEP weisen damit einen Punkt auf. Beispiele sind:

- 10.1 = Geometrie des Grubengebäudes
- 11.1 = Radionuklidinventar der Abfälle
- 11.2 = Konditionierung der Abfälle und Eigenschaften der Abfallmatrix
- 11.11 = Lösungskontakt von Suspension und Abfall
- 12.23 = Speziation und Löslichkeit eines Radionuklids im ELB⁴

Transport-FEP werden durch die Nummer des Primär-FEP, zu dem sie gehören, und einer zusätzlichen Ordnungszahl bezeichnet. Die Nummern der Transport-FEP weisen zwei Punkte auf. Beispiele sind:

- 11.11.1 = Mobilisierung durch Zersetzung der Abfallmatrix
- 12.23.1 = Ausfällung von Radionukliden außerhalb der Abfallgebände
- 12.23.2 = Lösung von Radionukliden durch zeitliche Änderung der Löslichkeit

⁴ ELB = Abkürzung für Einlagerungsbereich (vgl. Kapitel 4.1)

Variant-FEP, die einem Transport-FEP zugehören, werden durch die Nummer des Transport-FEP und durch eine zusätzliche Ordnungszahl gekennzeichnet. Variant-FEP weisen Nummern mit drei Punkten auf. Ein Beispiel ist:

11.11.1.1 = Mobilisierungsrate und Verzögerung der Mobilisierung

Variant-FEP, die sich auf einen Primär-FEP beziehen, weisen als dritte Zahl die Ziffer 0 auf:

12.23.0.1 = Abhängigkeit der Speziation und der Löslichkeit vom chemischen Milieu

12.23.0.2 = Abhängigkeit der Löslichkeit von nichtradioaktiven Isotopen des gleichen Elements

Übrige-FEP unterscheiden sich von den Primär-, Transport- und Variant-FEP dadurch, dass sie für die betrachtete Szenariengruppe nicht unterstellt werden. Übrige-FEP können aber von ihrer inhaltlichen Bedeutung her einer der anderen drei FEP-Kategorien zugeordnet werden. Dementsprechend gestaltet sich auch ihre numerische Kennzeichnung analog zu jener der anderen drei FEP-Kategorien. Beispiele sind:

12.27 = nukleare Kritikalität

14.10 = Sorption am Salzversatz und Salzgestein im Baufeld in der Südflanke

15.11.2 = Speicherung radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im aufgelockerten Steinsalz in der Südflanke

Die Nummer eines FEP ist für jede Szenariengruppe identisch.

Exemplar für BMBF und BMLU

4 Multibarrierensystem (MBS)

Die PROSA-Methodik zur Szenarienidentifikation beruht auf einer Strukturierung des Barrierensystems in einzelne Teilsysteme und deren Kompartimente. Die hier verwendete Unterteilung gliedert das MBS in die Teilsysteme „Nahfeld“, „Hutgestein und Deckgebirge (Fernfeld)“ und „Biosphäre“, sie ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

Die Teilsysteme werden mit einziffrigen Nummern versehen, ihre Kompartimente mit zweiziffrigen Nummern, wobei die erste Ziffer die zugehörige Teilsystemnummer ist (vgl. Kapitel 3).

Die Strukturierung des Teilsystems „Nahfeld“ ist in [Colenco 2006c] diskutiert und wird hier in Kapitel 4.1 kurz rekapituliert. Ergänzende Ausführungen zum Kompartiment Wirtsgestein enthält Kapitel 4.2. Abbildung 4-2 zeigt schematisch die topologische Anordnung der Nahfeld-Kompartimente (inklusive Wirtsgestein). Die Kompartimente des Teilsystems „Hutgestein und Deckgebirge“ sind in Kapitel 4.3 aufgeführt. Das Teilsystem „Biosphäre“ wird in Kapitel 4.4 diskutiert.

4.1 Kompartimente des Teilsystems Nahfeld

Das Teilsystem Nahfeld wird in folgende Kompartimente gegliedert (vgl. [Colenco 2006c]):

- | | |
|--|---|
| 11 <i>Abfall,
Abfallmatrix,
Abfallbehälter</i> | Das Kompartiment 11 umfasst die einzelnen Abfallgebinde, d.h. den Abfall, die Abfallmatrix und den Abfallbehälter, einschließlich – falls vorhanden – die verlorene Betonabschirmung. |
| 12 <i>Einlagerungsbereich (ELB)</i> | Das Kompartiment 12 beschreibt den Einlagerungsbereich, abgekürzt ELB ⁵ . Dieses Kompartiment umfasst die Einlagerungskammern, ihre benachbarten Grubenbaue, das angrenzende Salinar und die abgrenzenden Strömungsbarrieren. Es werden diejenigen Einlagerungskammern und Grubenbaue jeweils zu einem Einlagerungsbereich zusammengefasst, die aufgrund des hohen Durchbauungsgrades und intensiver Auflockerung hydraulisch gut miteinander verbunden sind. |
| 13 <i>Nahbereich</i> | Das Kompartiment 13, der Nahbereich, umfasst die Grubenbaue und das Salinar in der Umgebung der Einlagerungsbereiche. Beim Nahbereich der LAW-Kammern handelt es sich um die Grubenbaue der 775-m-, der 750-m- und der 725-m-Sohle, sofern sie nicht zu einem Einlagerungsbereich (Kompartiment 12) gehören, sowie das Carnallitit-Baufeld. Das Salinar zwischen diesen Grubenbauen und jenes, das diese Grubenbaue gegen das übrige Grubengebäude abgrenzt, werden ebenfalls |

⁵ Die räumliche Abgrenzung der Einlagerungsbereiche erfolgt in [Colenco 2006c].

dem Kompartiment 13 zugewiesen.

Zum Nahbereich des Einlagerungsbereichs MAW (MAW-Kammer) werden die Abbaue 8a und 8b auf der 532-m-Sohle, das umgebende Salinar und die Durchhiebe in die benachbarten Abbaue des Baufeldes in der Südflanke gezählt.

- | | | |
|----|----------------------------------|--|
| 14 | <i>Übriges
Grubengebäude</i> | Das Kompartiment 14 umfasst schließlich alle übrigen Grubenbaue, das angrenzende Salinar und insbesondere auch die Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke. |
| 15 | <i>Wirtsgestein</i> | Das letzte Kompartiment des Nahfeldes, 15, und somit der Anschluss zum Hutgestein und Deckgebirge, setzt sich aus dem Wirtsgestein zwischen dem Kompartiment 14 und dem Hutgestein bzw. dem Deckgebirge sowie den Verschlüssen der Tagesschächte unterhalb des Salzspiegels zusammen. Dieses Kompartiment besteht aus Gesteinen des Zechstein, die sich an das Grubengebäude anschließen, und dem Rötsteinsalz (so1Na) in der Südflanke. |

4.2 Wirtsgestein

Das Nahfeld-Kompartiment 15 „Wirtsgestein“ grenzt an das Barrieren-Teilsystem „Hutgestein/Deckgebirge“ und bestimmt somit die Schnittstelle zwischen den beiden Teilsystemen. Aus diesem Grund werden die potentiellen Wegsamkeiten im Wirtsgestein nachfolgend ausführlich diskutiert und in die Szenarienentwicklung „Geosphäre“ einbezogen. Der Bericht zur Szenarienentwicklung „Nahfeld“ [Colenco 2006c] konzentriert sich auf die Transportprozesse im Wirtsgestein und diskutiert, ergänzend zu Kapitel 6.2 im vorliegenden Bericht, die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den beiden Teilsystemen.

Bestehende Wegsamkeiten für Lösung, die in der Betriebsphase aus dem Deckgebirge in die Grube zutritt, und für potentiell kontaminierte Lösung, die in der Nachbetriebsphase aus der Grube in das Deckgebirge ausgepresst wird, verlaufen im Wirtsgestein in der Zone der gebirgsmechanisch beanspruchten, desintegrierten Steinsalz-Barriere an der Südflanke der Salzstruktur, welche von den Grubenbauen bis in das Deckgebirge reicht.

Als potentielle hydraulische Wegsamkeiten vom Grubengebäude durch das Wirtsgestein in das Deckgebirge sind grundsätzlich weiter zu betrachten

- die Tagesschächte mit Schachtverschluss
- die Schichten im Wirtsgestein
 - Anhydritmittel der Leine-Serie (am4 bis am7)
 - Roter Salzton der Aller-Serie (T4)
 - Pegmatitanhydrit der Aller-Serie (A4)
- das Kaliflöz Staßfurt (K2C) in Verbindung mit Umlöseprozessen
- alte Bohrungen, sofern ungenügend verschlossen

- Blindschächte und Erkundungsstrecken, welche bis in oder nahe an das Deckgebirge führen

Gebirgsmechanisch ungestörtes Salinar kann als undurchlässig betrachtet werden. Der Hauptanhydrit (A3) bildet keine potentiellen Wegsamkeiten, da er im Bereich der Schachtanlage Asse II nur in tektonischen Schollen mit lokal begrenzter Ausdehnung vorkommt und hydraulische Verbindungen zwischen diesen Schollen und dem Hutgestein oder dem Deckgebirge auszuschließen sind [Ercosplan 2003].

4.3 Hutgestein und Deckgebirge

Das Teilsystem 2 (Hutgestein und Deckgebirge) umfasst die gesamte übrige Geosphäre am Standort Asse. Gestützt auf die Ergebnisse der „Hydrogeologischen Modellvorstellungen“ [Colenco 2006a] wird sie wie folgt gegliedert:

- 21 Hutgestein und verstütztes Deckgebirge, inkl. Subrosionsgerinne am Salzspiegel
- 22 Rötanhydrit (so1A) der SW-Flanke unterhalb des Salzspiegels
- 23 Röttaquitard (so2 - so4) der SW-Flanke
- 24 Muschelkalkaquifer der SW-Flanke
- 25 Deckgebirge im stratigraphisch Hangenden des Muschelkalk der SW-Flanke
- 26 Geringleiter des Unteren Buntsandstein (su) der NE-Flanke
- 27 Aquifer des Unteren Buntsandstein in der NE-Flanke an der Grenze zum Mittleren Buntsandstein (su-p, Rogenstein)
- 28 Deckgebirge im stratigraphisch Hangenden des Rogenstein der NE-Flanke
- 29 Oberflächennahe Grundwasserleiter: Quartär, insbesondere Quartärrinnen über den Störungen von Wittmar und der Ammerbeek sowie über der Diagonalstörung von Groß Vahlberg; zudem die oberflächennahen, gut durchlässigen Süßwasserbereiche der Trias und des übrigen Mesozoikum

Die Störungen, auch die Diagonal- bzw. Querstörungen von Ammerbeek und Wittmar, sowie die Diagonalstörung von Groß Vahlberg und die Störung bei Groß Denkte bilden keine gesonderten Kompartimente des Teilsystems Hutgestein / Deckgebirge. Sie sind wichtige FEP, welche die Wirksamkeit der Barrieren-Kompartimente beeinflussen.

4.4 Biosphäre

Zur Biosphäre wird hier die belebte Umwelt im Boden und oberhalb der Geländeoberfläche gezählt. Die Biosphäre wirkt nicht als Barriere im eigentlichen Sinne.

Die Biosphäre führt zu einer weiteren Verdünnung von kontaminierten Lösungen bzw. Wässern, in einzelnen Komponenten jedoch auch zu einer Akkumulation von freigesetzten Radionukliden. Zudem bestimmt die Biosphäre über die verschiedenen möglichen Expositionspfade die Strahlenexposition der zu unterstellenden betroffenen Personen.

Die Verhältnisse in der Biosphäre, die klimatischen Verhältnisse wie auch die Lebens- und Verzehrsgewohnheiten der Menschen dürfen für einige Tausend Jahre als angenähert konstant angenommen werden [SSK 1988] – angesichts der wachsenden Erkenntnisse zur anthropogenen Klimabeeinflussung möglicherweise auch nur für eine kürzere Zeitperiode. *Für jenseits von 10'000 Jahren liegende Zeiträume werden die Ansätze über die dann herrschenden Umgebungs- und Ausbreitungsbedingungen in den grundwasserführenden Schichten immer hypothetischer, so dass die Zuverlässigkeit einer Analyse stark abnimmt und insbesondere der Ermittlung von Individualdosen (...) keine belastbare Aussagekraft mehr zukommt. Betrachtungen der geologischen Gegebenheiten für Zeiträume jenseits von 10'000 Jahren können jedoch dazu dienen, das Isolationspotential des betrachteten Systems (Begriffsänderung durch die Autoren) standortspezifisch zu prognostizieren* (Zitat aus [SSK 1988]).

Aus diesem Grund wird darauf verzichtet, für die Biosphäre eine Szenarientwicklung durchzuführen. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit sind vielmehr unabhängig von der Zeit typische, den heutigen Bedingungen entsprechende Verhältnisse zu unterstellen.

Exemplar für BMBF und BML

5 Systembeschreibung Geosphäre

Die Systembeschreibung bildet die Grundlage für die Identifikation der FEP und für die Bewertung ihrer Bedeutung hinsichtlich Langzeitsicherheit. Nachfolgend wird das System „Geosphäre“, d.h. einerseits das Wirtsgestein als Teil des Nahfeldes und andererseits das Hutgestein und Deckgebirge beschrieben und die diesem Barrieren-Kompartiment bzw. Teilsystem zuzuordnenden FEP identifiziert. Die Systembeschreibung „Nahfeld“ in [Colenco 2006c] beschreibt das Wirtsgestein summarisch und diskutiert ausführlich die dort stattfindenden oder möglicherweise stattfindenden Transportprozesse.

Die Schnittstelle zwischen den Teilsystemen „Hutgestein und Deckgebirge“ und „Nahfeld“ lässt sich wie folgt strukturieren (vgl. auch Kapitel 6.2):

- Wirkung von Deckgebirge / Hutgestein auf die Salzstruktur und das Grubengebäude:
 - Gebirgsdruck
 - hydraulischer Druck am Kontakt
 - Verfügbarkeit und chemische Zusammensetzung von Deckgebirgslösungen und -wässern in den bestehenden und den potentiellen Wegsamkeiten durch das Wirtsgestein ins Grubengebäude
 - Subrosion
- Wirkung von der Salzstruktur und vom Grubengebäude auf das Deckgebirge / Hutgestein:
 - Gebirgsmechanische Stützwirkung
 - Veränderung des hydraulischen Drucks durch Auspressen von Lösung
 - Veränderung des chemischen Milieus durch Auspressen von Lösung
 - Änderung der Sättigungsverhältnisse durch das Austreten von Gas
- Austreten von Radionukliden aus dem Nahfeld in das Deckgebirge / Hutgestein (Ort und Rate)

5.1 Heutige Verhältnisse am Standort

In den nachfolgenden Kapiteln 5.1.1 bis 5.1.4 werden die Wechselwirkungen zwischen Deckgebirge und Salzstruktur, die langzeitrelevanten Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse im Wirtsgestein und im Deckgebirge dargestellt und die sich daraus ableitenden FEP benannt. Insbesondere werden die Möglichkeiten für den Fluss von Lösung durch das Wirtsgestein und Deckgebirge in und aus dem Grubengebäude sowie den Gasfluss aus dem Grubengebäude diskutiert. Die möglichen Wege für Lösungs- und Gasfluss aus dem Grubengebäude durch das Wirtsgestein und Deckgebirge sind auch die möglichen Transportpfade für Radionuklide bis in die Biosphäre.

Eine Übersicht über die identifizierten möglichen Transportpfade für Radionuklide enthält Kapitel 5.1.5. Die im vorliegenden Bericht identifizierten Transportpfade sind zwar vom geologischen Aufbau des Deckgebirges her möglich, von den hydraulischen Durchlässigkeiten der Schichten her denkbar, jedoch im Hinblick auf das Vorliegen von ausreichenden hydraulischen Druckdifferenzen zunächst nicht überprüft. Die quantitative Überprüfung der möglichen Ausbreitungspfade erfolgt mit den numerischen Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Deckgebirge [Colenco 2006b]. Ein nachfolgend im Rahmen der Szenarienentwicklung identifizierter Transportpfad braucht daher in der Realität nicht aufzutreten.

5.1.1 Gebirgsmechanische Verhältnisse

Die heutigen gebirgsmechanischen Verhältnisse sind bestimmt durch (1) die steilstehenden Flanken der Salzstruktur mit den entsprechend steil einfallenden Schichten des Deckgebirges, (2) das durch Subrosionsprozesse entstandene verstrüzte Deckgebirge und (3) die intensive Bergbautätigkeit in der Salzstruktur über längere Zeiten, die zu starken Konvergenz- und Verformungsbewegungen und zu einer gebirgsmechanischen Entfestigung und Dilatanz des Zechstein und der angrenzenden Deckgebirgsschichten an der SW-Flanke führte [IfG 2006a]. Aufgrund der Strukturverhältnisse entwickelte sich durch die Subrosion und die bergbaubedingte Konvergenz eine gewisse Gewölbewirkung im Deckgebirge, welche einen Teil der lithostatischen Auflast trägt und ein komplexes Tragsystem Deckgebirge – Salzstruktur – Grubengebäude zur Folge hat.

Die bergbaubedingten Verformungen in der Südflanke der Salzstruktur und im angrenzenden Deckgebirge waren besonders in den 80er Jahren intensiv und führten zum heutigen Lösungszutritt an der Südflanke (vgl. Kapitel 5.1.2). Heute sind die Verformungsraten konstant bis leicht abnehmend. Mit den Maßnahmen zum Verschließen der Schachanlage, insbesondere dem Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks in der Grube während des Einleitens von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke, wird die Verformungsrate trotz Durchfeuchtung der Tragelemente im Grubengebäude nicht ansteigen, eventuell sogar deutlich abnehmen [IfG 2006a]. Spätestens in der Nachbetriebsphase, nach dem Ausgleich des hydraulischen Drucks zwischen Grubengebäude und Deckgebirge, wird die Verformungsrate in der Südflanke signifikant abnehmen [IfG 2006b]. Ein signifikantes Anwachsen der bergbaubedingt aufgelockerten Zone im Deckgebirge bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase⁶ ist deshalb nicht zu unterstellen. Die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke kann sich in dieser Zeit noch in beschränktem Maße ausdehnen.

Für die gebirgsmechanischen Verhältnisse ergeben sich somit folgende FEP:

⁶ Die Nachbetriebsphase wird in [Colenco 2006c] in drei Teile unterteilt. Die frühe Nachbetriebsphase beginnt mit dem Einstellen der Druckhaltung für das Einleiten des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle und dem definitiven hydraulisch wirksamen Verschluss der Tagesschächte und dauert, bis der Fluiddruck im Grubengebäude soweit angestiegen ist, dass der Lösungszutritt aus dem Deckgebirge durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2) endet und Lösung durch weiter anhaltende Konvergenz und Gasspeicherung aus der Grube in das Deckgebirge ausgepresst wird. Die anschließende mittlere Nachbetriebsphase dauert bis zum Einsetzen des Gasaustritts aus der Grube in das Deckgebirge. Die darauf folgende späte Nachbetriebsphase ist zeitlich unbegrenzt.

Primär-FEP	10.6	Konvergenz des Grubengebäudes
Primär-FEP	15.1	Aufbau des Wirtsgesteins
Primär-FEP	15.2	Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke
Variant-FEP	15.2.0.1	Größe der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke
Variant-FEP	15.2.0.2	Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase
Primär-FEP	15.3	Spannungszustand im Wirtsgestein
Variant-FEP	15.3.0.1	Änderung des Spannungszustands im Wirtsgestein durch fortschreitende Konvergenz des Grubengebäudes bei Umsetzen der Schließungsmaßnahmen
Primär-FEP	15.4	Subrosion des Wirtsgesteins
Primär-FEP	20.1	Aufbau von Deckgebirge und Hutgestein
Primär-FEP	20.2	Auflockerungszone im Deckgebirge (SW-Flanke) bezüglich gebirgsmechanischer Verhältnisse
Variant-FEP	20.2.0.1	Ausdehnung der Auflockerungszone im Deckgebirge
Variant-FEP	20.2.0.2	Anwachsen der Auflockerungszone im Deckgebirge bis Ende der frühen Nachbetriebsphase
Primär-FEP	20.3	Spannungszustand im Deckgebirge (Gewölbewirkung)
Primär-FEP	21.1	Aufbau von verstürztem Deckgebirge und Hutgestein
Primär-FEP	21.7	fortschreitender Versturz des Deckgebirges über dem Salzspiegel

Durch die geogenen gebirgsmechanischen Prozesse und durch Salzwanderung längs der Salzstruktur entstanden im Deckgebirge im Nahbereich der Asse zahlreiche Störungen, vor allem oberhalb der Salzstruktur (verstürztes Deckgebirge) und in der SW-Flanke. Diese verlaufen zum Teil steilstehend längs der Salzstruktur, teilweise flach und schichtquerend längs der Struktur oder auch steilstehend quer zur Struktur. Die Salzstruktur der Asse entstand durch regionaltektonische Prozesse. Halokinetische Prozesse setzten erst in der Folge ein, sie waren nicht initial.

Primär-FEP	20.4	Störungen im Deckgebirge
------------	------	--------------------------

Variant-FEP	20.4.0.1	Lage der Störungen im Deckgebirge
-------------	----------	-----------------------------------

Die gebirgsmechanisch am intensivsten beanspruchte Zone befindet sich an der SW-Flanke der Salzstruktur im Bereich der Schachtanlage Asse II. Dort ist sowohl von einem Integritätsverlust des Zechsteinsalzes als auch von einer erhöhten Permeabilität des angrenzenden Röt1 (so1Na und so1A) auszugehen. Die Zone mit bergbaubedingt intensiver Beanspruchung reicht nach den Modellrechnungen [IfG 2006a] nicht bis in die Teufe der LAW-Kammern und auch nicht nach oben bis zum Salzspiegel.

Primär-FEP	22.1	bergbaubedingte Auflockerungszone im Rötanhydrit so1A in der SW-Flanke
Variant-FEP	22.1.0.1	Größe der bergbaubedingten Auflockerungszone im Rötanhydrit so1A
Variant-FEP	22.1.0.2	bergbaubedingtes Anwachsen der Auflockerungszone im Rötanhydrit so1A
Variant-FEP	22.1.0.3	erhöhte Permeabilität des bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit so1A

Die gebirgsmechanischen Berechnungen [IfG 2006a] zeigen auch eine starke Beanspruchung durch Scherdeformationen im südlich anschließenden Rötäquitard (so2–so4). Diese ist am ausgeprägtesten in einem Bereich, der sich von der Flanke der Salzstruktur (Teufenbereich von ca. 500 m bis zur 574-m-Sohle) schräg ansteigend und entlang der geologischen Trennfläche S3/D9 bis in den Muschelkalk erstreckt. Mikro-seismische Messungen zeigen in Übereinstimmung mit diesen Modellergebnissen eine erhöhte Aktivität in diesem Bereich. Es ist deshalb davon auszugehen, dass der Rötäquitard so2-so4 im umschriebenen Bereich bergbaubedingt aufgelockert ist und eine erhöhte Permeabilität aufweist. Der Bereich wird mit „Scherdeformationsbereich S3/D9“ bezeichnet.

Primär-FEP	23.1	bergbaubedingte Auflockerungszone im Rötäquitard so2-so4 in der SW-Flanke, speziell Scherdeformationsbereich S3/D9
Variant-FEP	23.1.0.1	Größe der bergbaubedingten Auflockerungszone des Rötäquitards
Variant-FEP	23.1.0.2	bergbaubedingtes Anwachsen der Auflockerungszone im Rötäquitard
Variant-FEP	23.1.0.3	Permeabilität der bergbaubedingten Auflockerungszone im Rötäquitard

Aufgrund des heutigen Lösungszutritts zum Grubengebäude (vgl. Kapitel 5.1.2) ist der Lösungsdruck in der Südflanke des Deckgebirges lokal gegenüber hydrostatischen Verhältnissen erniedrigt. Die Druckabsenkung ist nahe der Übertrittsstelle durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2), d.h. im Rötanhydrit in 500 m bis 574 m Teufe an der Flanke des Grubengebäudes, am stärksten. Die Druckabsenkung nimmt mit zunehmendem Abstand von der Übertrittsstelle ab, im Rötanhydrit und im bergbaubedingt aufgelockerten Bereich des Rötäquitard über größere, im geringer durchlässigen intakten Rötäquitard über kürzere Distanzen. Aufgrund des relativ niedrigen Lösungsdrucks sind die effektiven Gebirgsspannungen nahe der Übertrittsstelle heute gegenüber den Verhältnissen vor dem Einsetzen des Lösungszutritts hydraulisch erhöht.

Mit dem Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks in der Grube für das Einleiten des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle wird auch Druckluft aus dem Grubengebäude

in das Deckgebirge ausgepresst. Im Deckgebirge entsteht dadurch nahe der Übertrittsstelle ein an Lösung ungesättigter Bereich. Wenn ein solcher bereits heute als Folge des Lösungszutritts besteht, wird er durch das Entweichen von Druckluft aus dem Grubengebäude anwachsen. Die hydrogeologischen Modellrechnungen zeigen, dass der sich ausbildende, an Lösung ungesättigte Deckgebirgsbereich bei der vorgesehenen Höhe des pneumatischen Stützdrucks von beschränkter Ausdehnung bleibt und insbesondere nicht bis zur Geländeoberfläche reicht [Colenco 2006b].

Mit Beginn der Nachbetriebsphase, wenn der Gasdruck im Grubengebäude und damit auch in der an Lösung ungesättigten Zone im Deckgebirge nicht mehr geregelt wird, steigt der Fluiddruck im Deckgebirge nahe der Übertrittsstelle durch Nachfließen von Deckgebirgslösung in den ungesättigten Bereich – eventuell auch durch ein Austreten von Lösung aus der Grube – an, wodurch die effektiven Gebirgsspannungen im Deckgebirge an der Flanke des Grubengebäudes rasch abnehmen. (Die nachfolgend definierten FEP, welche die hydraulischen Bedingungen an der Übertrittsstelle charakterisieren, sind speziell im Hinblick auf die spätere Diskussion des Lösungsflusses zwischen Deckgebirge und Grubengebäude formuliert. Sie beschreiben den hier interessierenden Sachverhalt aber ebenfalls.)

Primär-FEP	20.5	hydraulische Randbedingung im Rötanhydrit in der Südflanke (Ort von FEP 15.6)
Variant-FEP	20.5.0.1	hydraulischer Druck am Ort von FEP 15.6 zu Beginn des Schutzfluid-Einleitens auf der 750-m-Sohle
Primär-FEP	10.34	Austreten von Druckluft aus der Grube in das Deckgebirge nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks in der Grube
Primär-FEP	20.26	Entstehung einer an Lösung ungesättigten Zone im Deckgebirge nahe der Übertrittsstelle FEP 15.6 durch das Austreten von Druckluft in der Betriebsphase (FEP 10.34)
Variant-FEP	20.26.0.1	Ausdehnung des an Lösung ungesättigten Deckgebirgsbereichs nahe des Orts von FEP 15.6
Variant-FEP	20.26.0.2	Fluiddruck nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks und während der frühen Nachbetriebsphase am Ort von FEP 15.6 (zeitabhängig)
Variant-FEP	20.3.0.1	Abnahme der effektiven Gebirgsspannung im Deckgebirge in der Flanke des Grubengebäudes durch ansteigenden Fluiddruck ab Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks und ausgeprägter ab Beginn Nachbetriebsphase

Neben der bergbaubedingten Beanspruchung des Röt führte die Aufwölbung der Salzstruktur, also geogene Prozesse, dazu, dass der Rötanhydrit so1A in der SW-Flanke höhere hydraulische Durchlässigkeiten aufweist als typischerweise ein Anhydrit in tektonisch ungestörten Bereichen. Die geogen beanspruchte Zone erstreckt sich entlang der gesamten SW-Flanke der Salzstruktur und reicht in der Tiefe bis in den Bereich der Anhydritaufwölbung am Fuß der Salzstruktur. Die erhöhte Permeabilität erlaubt schichtparallele Flüsse im Rötanhydrit in der SW-Flanke.

Primär-FEP	22.2	Folgen der geogenen Beanspruchung im Rötanhydrit so1A
------------	------	---

Variant-FEP	22.2.0.1	hydraulische Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit so1A
Primär-FEP	22.5	Grundwasserfluss im Rötanhydrit (so1A)

Das Wirtsgestein ist sowohl zwischen dem Grubengebäude Asse II und dem Salzspiegel als auch gegen die NE-Flanke geomechanisch intakt, d.h. nicht überbeansprucht, und somit hydraulisch undurchlässig.

Vergleichbare Verhältnisse wie im Deckgebirge in der SW-Flanke der Schachanlage Asse II sind in der SW-Flanke der Schachanlage Asse I nicht zu erwarten. Diese liegt eher in der NE-Flanke der Salzstruktur, so dass der Rötanhydrit in der SW-Flanke dort höchstens geringfügig bergbaubedingt aufgelockert ist. In der SW-Flanke der Salzstruktur konnte sich deshalb keine ausgedehnte Zone mit bergbaubedingt aufgelockertem Rötanhydrit gebildet haben, die sich von der Flanke der Schachanlage Asse I bis zu jener der Schachanlage Asse II erstreckt. Die Zone in der Flanke der Schachanlage Asse II (FEP 22.1) ist somit räumlich auf die Ausdehnung der Schachanlage begrenzt.

5.1.2 Lösungszutritt

Heute treten ins Grubengebäude Asse II ca. 12,5 m³/Tag Lösung zu. Eine ausführliche Diskussion enthält [GSF 2006a]. Von den identifizierten, nach 1988 noch aktiven Zutrittsstellen ist lediglich der Salzlösungszufluss in der Abbaureihe 3 an der Südflanke von potentieller Bedeutung für die Langzeitsicherheit.

Der erste beobachtete Lösungszutritt, der mit dem genannten Lösungszufluss in der Südflanke in Verbindung gebracht wird, erfolgte im Abbau 5 der 532-m-Sohle und datiert vom August 1988. In der Folgezeit verlagerte sich die beobachtete Zutrittsstelle im Grubengebäude mehrmals und drang dabei in größere Teufen vor: Heute wird die Deckgebirgslösung in der Kammerreihe 3 auf der 637-m-Sohle aufgefangen. Während dieser Zeit nahm die Zutrittsrate stufenweise, aber nur langsam, auf den heutigen Wert zu. Seit 1998 ist die Zutrittsrate weitgehend konstant. Der zurzeit beobachtete Lösungszutritt in das Grubengebäude ist an NaCl und CaSO₄ gesättigt sowie an MgCl₂ und MgSO₄ untersättigt [Ercosplan 2003].

Geochemische Untersuchungen der an der Südflanke zutretenden Salzlösung zeigen, dass sich diese zum Großteil aus Deckgebirgslösung zusammensetzt ([GSF 2006a] und dort zitierte Unterlagen). Dies bedeutet, dass der Lösungszutritt – mindestens vorwiegend – entlang einer oder mehreren Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere erfolgt. Aufgrund der geologischen und gebirgsmechanischen Verhältnisse kann der Ort dieser Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere auf die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2) eingegrenzt werden (vgl. Kapitel 5.1.1). Die Teufe des beobachteten Lösungszutritts (im Grubengebäude) entspricht somit nicht der Teufe, in der die Lösung die Steinsalz-Barriere durchdringt und in den Bereich des Grubengebäudes gelangt. Zwischen der Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere und der Zutrittsstelle im Grubengebäude fließt die Lösung in der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke (vgl. [Colenco 2006c]).

Primär-FEP	10.4	Lösungszutritt aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude
------------	------	---

Variant-FEP	10.4.0.1	Rate des Lösungszutritts aus dem Deckgebirge
Variant-FEP	10.4.0.2	NaCl-Sättigung der Lösung aus dem Deckgebirge beim Eintritt in die Wegsamkeit FEP 15.6
Variant-FEP	10.4.0.3	MgCl ₂ - und MgSO ₄ -Konzentration der Lösung aus dem Deckgebirge beim Eintritt in die Wegsamkeit FEP 15.6
Primär-FEP	15.6	hydraulische Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2) im Teufenbereich 500 m bis 574 m
Variant-FEP	15.6.0.1	Orte der Wegsamkeiten FEP 15.6
Variant-FEP	15.6.0.2	hydraulische Leitfähigkeit der Wegsamkeiten FEP 15.6

Hinsichtlich der Herkunft der Lösungen und der Fließpfade im Deckgebirge führte eine Synthese der Ergebnisse von Arbeiten im Rahmen der Erkundung und Neubewertung der geologisch-tektonischen Situation an der Südflanke der Schachanlage, der geotechnischen Sicherheitsbewertung, von gebirgsmechanische Modellrechnungen, von hydrogeologischen Erkundungen und Überlegungen, von geochemischen Analysen und deren Bewertung, von isotopengeochemischen Arbeiten sowie von geophysikalischen Erkundungen zu einem in sich geschlossenen Modell zur Herkunft des aktuellen Salzlösungszuflusses an der Südflanke [GSF 2006a]. Die für die Langzeitsicherheit wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Lösungszutritt erfolgt vollumfänglich entlang der Wegsamkeit(en) aus dem Deckgebirge durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.6). Das oben angeführte Ergebnis der geochemischen Untersuchungen, wonach sich der Lösungszutritt „nur“ zu einem Großteil aus Deckgebirgslösung zusammensetzt, ist auf MgSO₄-haltige Minerale im Röt zurückzuführen, die nach Eindringen von Mg-haltigen Lösungen aus dem Zechstein während der Bildung der Salzstruktur entstanden sind.
- Der wahrscheinlich wichtigste Fließpfad im Deckgebirge verläuft aus dem Unteren Muschelkalk und/oder Oberen Buntsandstein über den Scherdeformationsbereich S3/D9 (FEP 23.1) sowie entlang geogen angelegten Störungen durch den Rötäquitard so2-so4 in den Rötanhydrit so1A und – ggf. nach einem Transportabschnitt im Streichen dieser Schicht – in die bergbaubedingte Auflockerungszone (FEP 22.1), aus welcher die Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere (FEP 15.6) in das Grubengebäude führen.
- Darüber hinaus kann der Zufluss untergeordnet auch über geogen angelegte Klüfte im Rötanhydrit so1A und entlang dieser Schicht aus dem verstürzten Deckgebirge und aus dem Kluftporenraum des Rötanhydrit selbst gespeist werden.
- Ein dritter möglicher Weg verläuft vom Salzspiegel westlich von Schacht Asse 4 entlang der dort möglicherweise ausstreichenden Anhydritmittel durch den Zechstein und dann über einen hydraulischen Kontakt oberhalb der bergbaubedingt aufgelockerten Zone (FEP 22.1) in den Rötanhydrit in der Südflanke. Der weitere Verlauf des Fließpfads führt – wie beim vorgenannten Pfad – über geogen angelegte Klüfte im Rötanhydrit in dessen bergbaubedingt aufgelockerten Bereich (FEP 22.1) und weiter in das Grubengebäude. Dieser Pfad über die Anhydritmittel wird in [GSF 2006a] als unwahrscheinlich eingestuft. Ein direkter Pfad entlang der Anhydritmittel in das Grubengebäude – ohne Verlauf durch den Rötanhydrit – kann mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden [GSF 2006a].

Aus der zeitlichen Entwicklung des Lösungszutritts in das Grubengebäude seit 1988 kann geschlossen werden, dass die Rate des Lösungszutritts in der Vergangenheit einerseits durch die kleinräumigen hydraulischen Kontakte zwischen den Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere (FEP 15.6) und den Kluftwegsamkeiten im Rötanhydrit und andererseits durch die mittelskaligen hydraulischen Leitfähigkeiten entlang der Fließpfade im Deckgebirge bestimmt war. Die konzeptionelle Umsetzung dieser Überlegung ist in einem Anhang in [Colenco 2006a] für den Zutrittspfad entlang des Rötanhydrit dargestellt. Da die Zutrittsrate in den letzten Jahren trotz fortschreitender Verformung in der Südflanke nicht mehr nennenswerte Sprünge zeigte, kann eine kleinräumige Drosselung des heutigen Lösungszutritts durch gering durchlässige hydraulische Kontakte zwischen Wegsamkeiten in der Steinsalz-Barriere und solchen im Rötanhydrit wie auch durch die Wegsamkeiten in der Steinsalz-Barriere selbst ausgeschlossen werden. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Rate des heutigen und künftigen Lösungszutritts nur noch durch die mittelskaligen hydraulischen Leitfähigkeiten entlang der Fließpfade im Deckgebirge bestimmt ist.

Der hydraulische Widerstand des wahrscheinlich wichtigsten Fließpfades hängt in erster Linie vom Querschnitt und von der Permeabilität des Scherdeformationsbereichs S3/D9 ab. Diese Größen sind eine Folge der gebirgsmechanischen Beanspruchung des Deckgebirges, welche besonders in den 80er Jahren anstieg und auf die frühere Bergbautätigkeit zurückzuführen ist. Bei den derzeit konstanten bis leicht abnehmenden Deformationsraten ist mit keiner signifikant zunehmenden Deckgebirgsauflockerung zu rechnen, die zu einer deutlich höheren Permeabilität und damit zu einem erheblichen Ansteigen der Zutrittsrate entlang dieses Pfades führen würde. Durch die pneumatische Stützung des Grubengebäudes während des Einleitens von Schutzfluid oberhalb der 700-m-Sohle werden die Verformungsraten auch beim Umsetzen der Maßnahmen zum Verschließen der Schachanlage eher ab- als zunehmen. Eine gebirgsmechanisch bedingte Abnahme des hydraulischen Widerstands des Scherdeformationsbereichs S3/D9 in der Zukunft ist deshalb nicht zu unterstellen.

Nach den Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Deckgebirge tritt dem Scherdeformationsbereich S3/D9 aus dem Muschelkalk als Folge des heutigen Lösungszuflusses in die Grube an NaCl untersättigte Lösung zu [Colenco 2006b]. Ein Vordringen dieser untersättigten Lösung durch den Scherdeformationsbereich bis zur Flanke der Salzstruktur ist heute unwahrscheinlich, in der näheren Zukunft aber möglich. Da die Permeabilität des Scherdeformationsbereichs nicht durch Lösung von Halit ansteigen kann, bleibt die Rate des Lösungszutritts vom eventuellen Vordringen von untersättigter Lösung jedoch unbeeinflusst.

Von geringerer Bedeutung für den Fließpfad durch den Röttaquitard so₂-so₄ sind vermutlich die geogen angelegten Störungen, d.h. die Quer- und die Diagonalstörung der Ammerbeek sowie die nicht näher spezifizierten weiteren Störungen im Nahbereich der Übertrittsstelle FEP 15.6 (vgl. Kapitel 5.1.4.4). Maßgebend für deren Bedeutung für den Lösungszutritt in die Grube sind ihre hydraulischen Leitfähigkeiten. Je nach den Eigenschaften des Rötanhydrit, speziell FEP 22.1.0.1, 22.1.0.3 und 22.2.0.1, können auch Störungen in einiger Entfernung von der Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere (FEP 15.6) wirksam sein.

Neben den bereits in Kapitel 5.1.1 definierten FEP 23.1, 23.1.0.1 bis 23.1.0.3 sind die folgenden FEP von potentieller Bedeutung für den wahrscheinlich wichtigsten Fließpfad der heute in die Grube zutretenden Lösung im Deckgebirge

Variant-FEP	23.1.0.4	Ansteigen der Permeabilität der bergbaubedingten Auflockerungszone im Röttaquitard in der Betriebs- oder frühen Nachbetriebsphase
Primär-FEP	23.2	schichtquerende Störungen im Röttaquitard (SW-Flanke) mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit
Variant-FEP	23.2.0.1	Verlauf der Störungen im Röttaquitard
Variant-FEP	23.2.0.2	Transmissivität der Störungen im Röttaquitard

Die Anteile des Lösungszutritts entlang des Rötanhydrit-Pfades und entlang des Anhydritmittel-Rötanhydrit-Pfades werden durch die Permeabilität des Rötanhydrit (so1A), jener entlang des letztgenannten Pfades zusätzlich durch die Leitfähigkeit der Anhydritmittel zwischen deren Ausstreichen am Salzspiegel und dem Kontakt mit dem Rötanhydrit in der Südflanke bestimmt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Permeabilität des Rötanhydrit, genauer die räumlich gemittelte äquivalente Permeabilität des Kluftwasserleiters, in der bergbaubedingten Auflockerungszone (FEP 22.1.0.3) deutlich höher ist als im „lediglich“ geogen beanspruchten Bereich (FEP 22.2.0.1), so dass letzterer den Lösungszutritt entlang dieser Pfade drosselt⁷.

Anhydrit ist unter gewissen Verhältnissen verkarstungsanfällig, kann aber unter anderen Verhältnissen auch durch Ausfällung oder Mineralumbildung (Vergipsung) verheilen. So erhöht z.B. NaCl im Wasser die Löslichkeit von Gips und wirkt dadurch der Vergipsung entgegen. Auch bei lokal hohen Fließgeschwindigkeiten tritt keine Vergipsung ein. Andererseits gibt es auch Beispiele für die Vergipsung von Anhydrit unter salinaren Verhältnissen (z.B. Hauptanhydrit in der Schichtenfolge Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leine-Karbonat im Hutgestein des Endlagers Morsleben). Die Vergipsung des Rötanhydrit entlang des Zutrittspfades ist daher wenig wahrscheinlich, aber nicht unmöglich. In der Nähe des Salzspiegels dürfte der Rötanhydrit heute lokal verkarstet sein. Eine sichere Prognose der weiteren Entwicklung ist nicht möglich. Es besteht die Möglichkeit, dass die Leitfähigkeit des Rötanhydrit zwischen dem Salzspiegel und dem Bereich mit bergbaubedingter Auflockerung durch Lösungsprozesse (Verkarstung) zunimmt und dadurch der Lösungszutritt entlang des Rötanhydrit-Pfades (und ggf. auch Anhydritmittel-Rötanhydrit-Pfades) in der Betriebsphase noch deutlich anwächst. Der Fall eines unbeherrschbaren Lösungszutritts während der Betriebsphase ist im Langzeitsicherheitsnachweis nicht zu unterstellen. Ein beschränkt ansteigender Lösungszutritt während der Betriebsphase ist für die Langzeitsicherheit von geringer Bedeutung.

Primär-FEP	22.3	Verkarstung des Rötanhydrit
Variant-FEP	22.3.0.1	Fortschreiten der Verkarstung bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase
Variant-FEP	22.2.0.2	Ansteigen der hydraulischen Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit durch Verkarstung (Bezug zu FEP 22.3.0.1)
Primär-FEP	22.4	Vergipsung des Rötanhydrit
Variant-FEP	22.2.0.3	Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit durch Vergipsung (Bezug zu FEP 22.4)

⁷ Der Zutritt entlang des Anhydritmittel-Rötanhydrit-Pfades kann zusätzlich noch in den Anhydritmitteln gedrosselt werden.

Die Anhydritmittel sind nichtchloridische Horizonte, die im Salinar eingebettet und gegenseitig durch Steinsalz getrennt sind (vgl. auch Kapitel 5.1.3.3). Drei der Anhydritmittel-Horizonte am4, am6 und am7 sind mit jeweils 1 m bis 1,5 m relativ mächtig ausgebildet. Im Bereich von Schacht Asse 2 kulminieren sie mehr als 100 m oberhalb der obersten Grubenbaue, tauchen in der Nordflanke in große Teufen, in der Südflanke weniger als 100 m ab. Es ist möglich, dass diese Horizonte zwischen dem Schacht 4 und der Schachanlage Asse I am Salzspiegel ausstreichen und dadurch mit dem hydraulischen System im Hutgestein und verstürzten Deckgebirge in Kontakt stehen. Dies ist jedoch durch keine Bohrbefunde nachgewiesen. Als Folge der Fließverformungen des Salinars bei der Strukturbildung sind die Anhydritmittel sehr wahrscheinlich ruptuell beansprucht, teilweise boudiniert [Ercosplan 2004]. Beim Anbohren führten sie dennoch häufig Lösung mit einzelnen Hinweisen auf ausgedehnte Wegsamkeiten und relativ hohe Leitfähigkeit [GSF 2003a]. Sofern die Anhydritmittel mit dem Rötanhydrit in der Südflanke in hydraulischem Kontakt stehen und eine durchgehende Wegsamkeit bis zum Salzspiegel westlich von Schacht Asse 4 aufweisen, bilden sie zusammen mit dem Rötanhydrit den dritten der oben genannten Fließpfade. Obwohl dieser Pfad in [GSF 2006a] als unwahrscheinlich beurteilt wird, wird seine Existenz für den Langzeitsicherheitsnachweis in jedem Szenario unterstellt. Ein hydraulischer Kontakt zwischen den Anhydritmitteln und der Auflockerungszone des Grubengebäudes wird jedoch gestützt auf die Ergebnisse der Synthese in [GSF 2006a] ausgeschlossen.

Primär-FEP	15.25	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss entlang der Anhydritmittel vom Salzspiegel westlich Schacht 4 bis zum Kontakt mit dem Rötanhydrit in der Südflanke
Variant-FEP	15.25.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit FEP 15.25
Primär-FEP	15.26	hydraulischer Kontakt zwischen den Anhydritmitteln und der Auflockerungszone des Grubengebäudes

Von potentieller Bedeutung sind weiter die Beschaffenheit und die Wegsamkeiten des Fließsystems „Lösungszutritt zur Grube“ oberhalb des Salzspiegels, da sich bei einer lösungsbedingten Erhöhung der Durchlässigkeit des Rötanhydrit und dem dadurch verursachten Wegfallen der Barriere „Rötanhydrit“ die hydraulische Drossel der Fließpfade „Rötanhydrit“ und ggf. „Anhydritmittel-Rötanhydrit“ nach oben in das verstürzte Deckgebirge verlagern und das Einzugsgebiet oberhalb des Salzspiegels die Rate des Lösungszutritts zur Grube mitbestimmen dürfte.

Primär-FEP	21.2	Grundwasserfluss im Kompartiment 21
Variant-FEP	21.2.0.1	hydraulische Durchlässigkeit des verstürzten Deckgebirges
Variant-FEP	21.2.0.2	hydraulischer Kontakt zwischen dem Rötanhydrit und dem Kompartiment 21

5.1.3 Transportpfade für Grubenlösung und Gas im Wirtsgestein

5.1.3.1 Wegsamkeit durch gebirgsmechanisch gestörte Bereiche zur SW-Flanke

Als bestehende hydraulische Wegsamkeit zwischen Grubengebäude und Deckgebirge ist jene zu unterstellen, welche für den heutigen Lösungszutritt verantwortlich ist

(FEP 15.6, vgl. Kapitel 5.1.2). Durch Lösungsprozesse als Folge des heutigen Lösungszutritts könnte sich die hydraulische Leitfähigkeit dieser Wegsamkeit langfristig erhöhen. Nach den Ausführungen zur Drosselung des Lösungszutritts durch die mittelskalige Leitfähigkeit entlang den Wegsamkeiten im Deckgebirge in Kapitel 5.1.2 ist ein solcher Lösungsprozess von geringer Bedeutung für den Gesamtwiderstand entlang der verschiedenen Pfade, somit auch nicht relevant für den potentiellen Transport von Radionukliden entlang dieser Pfade. Eventuell stattfindende Lösungsprozesse sind zeitlich begrenzt, sie kommen in der Nachbetriebsphase zum Erliegen, sobald der Fluiddruck im Grubengebäude durch Konvergenz und Gasbildung über den hydrostatischen Druck im Deckgebirge ansteigt und der Zutritt von Wässern zum Erliegen kommt, d.h. am Ende der frühen Nachbetriebsphase.

Variant-FEP 15.6.0.3 Erhöhung der Leitfähigkeit durch Lösungsprozesse

Die Steinsalz-Barriere zwischen der Kontur der Abbaue und dem Rötanhydrit ist von 595 m bis 474 m Teufe gering mächtig, beträgt aber überall mindestens 8 m. Die durch bergbaubedingte Auflockerungen und Verformungen gebildete Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2) reicht von der 511-m-Sohle – eventuell auch von der 490-m-Sohle – bis zur 574-m-Sohle [IfG 2006a]. Mit dem Einleiten des Schutzfluids in das Baufeld in der Südflanke bei gleichzeitig aufgebrachtem pneumatischen Stützdruck werden zwar das Salzgestein und damit das Tragsystem des Grubengebäudes partiell durchfeuchtet, wodurch dessen Tragfähigkeit abnimmt, die Verformungen jedoch gleich bleiben oder sogar abnehmen [IfG 2006a]. Eine Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere nach oben bis in den Firstbereich der 490-m-Zone während des Umsetzens der Maßnahmen zum Schließen der Schachanlage und in der frühen Nachbetriebsphase ist damit zwar wenig wahrscheinlich, soll jedoch für den Nachweis der Langzeitsicherheit nicht kategorisch ausgeschlossen werden (FEP 15.2.0.2) (ausführlichere Diskussion in [Colenco 2006c]). Das gleiche gilt für ein Anwachsen der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere nach unten bis zur 595-m-Sohle. Hydraulisch wirksame Wegsamkeiten (FEP 15.6) im oberen Bereich der Zone FEP 15.2 sind als sicher, solche im unteren Bereich als eventuell bestehend zu unterstellen. Die genaue Zahl und Orte der Wegsamkeiten (FEP 15.6.0.1) sind nicht bekannt, sie entsprechen nicht den beobachteten Zutrittsorten in der Grube und können auch nicht ermittelt werden. Sie lassen sich jedoch zwischen 500 m, evtl. 474 m, und 574 m Teufe sowie aufgrund der beobachteten Zutrittsorte im Grubengebäude auf den Bereich vor den Kammerreihen K2 bis K5 eingrenzen.

Neben den mindestens teilweise als bestehend zu unterstellenden, zuvor beschriebenen Wegsamkeiten FEP 15.6 sind grundsätzlich folgende potentiellen Wegsamkeiten in Betracht zu ziehen (vgl. auch Kapitel 4.2):

- (1) Tagesschächte mit Schachtverschluss,
- (2) nichtchloridische Horizonte im Wirtsgestein,
- (3) Kaliflöze in Verbindung mit Umlöseprozessen und
- (4) alte, ungenügend verschlossene Bohrungen sowie Blindschächte und Strecken, welche bis ins Deckgebirge reichen.

Wegsamkeiten entlang anderer Strukturen, insbesondere entlang unentdeckter geologischer Strukturen, können ausgeschlossen werden. Die Salzstruktur der Asse ist sehr gut untersucht, so dass die Existenz von Strukturen, welche bei Zutritt von Lösung über nennenswerte Strecken Wegsamkeiten bilden können, nicht zu unterstellen ist.

Primär-FEP 15.15 Wegsamkeiten durch unentdeckte geologische Strukturen

Die zu diskutierenden potentiellen Wege (2), (3) und (4) führen nicht unbedingt direkt bis zum Salzspiegel oder in das Deckgebirge. Sie können theoretisch jedoch in Kombination eine solche Verbindung bilden oder eine hydraulische Verbindung zur Schachanlage Asse I und von dort zum Salzspiegel ermöglichen.

Nachfolgend werden die theoretisch denkbaren Wegsamkeiten im Wirtsgestein diskutiert, ihre Plausibilität bewertet und die entsprechenden FEP identifiziert.

5.1.3.2 Wegsamkeit entlang der Tagesschächte

Die Tagesschächte werden im intakten Jüngerem Steinsalz oberhalb der 490-m-Sohle mit je einem Verschlussbauwerk nach dem Stand von Wissenschaft und Technik versehen. Dieses ist dreiteilig und besteht von unten nach oben aus ca. 30 m Sorelbeton, anschließend 10 m Salzton und darüber ca. 10 m Bentonit [DBETec 2004]. Der Bentonitteil verhindert den Zutritt von Deckgebirgwässern zum Sorelbeton.

Das Verschlussbauwerk selbst kann sowohl für Lösung als auch für Gas als absolut dicht angenommen werden. Ein langfristiger Anstieg der Permeabilität ist sehr unwahrscheinlich, weder durch mechanische noch durch geochemische Einwirkungen (vgl. [Colenco 2006c]). Obwohl vor dem Einbau der Dichtelemente die Auflockerungszone geraubt wird, bleibt gleichwohl eine gewisse Auflockerung des Steinsalzes angrenzend an das Verschlussbauwerk bestehen oder bildet sich während des Einbaus neu. Mit dem anschließenden Aufkriechen des Gebirges auf das Bauwerk wird sich auch die Durchlässigkeit der Auflockerungen wieder verringern. Dieser Effekt ist jedoch nicht quantifizierbar. Es ist davon auszugehen, dass der integrale hydraulische Widerstand der Schachtverschlüsse durch die Auflockerungszone bestimmt wird.

Im Vergleich mit dem hydraulischen Widerstand der Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.6.0.2) und in der Flanke des Deckgebirges (FEP 22.1.0.3, 22.2.0.1, 23.1.0.3, 23.2.0.2) ist der Widerstand entlang der verschlossenen Schächte derart hoch, dass ein Lösungsaustritt entlang der Schächte – sofern er überhaupt stattfindet – vernachlässigbar gering ist. Von potentieller Bedeutung sind die Wegsamkeiten entlang der verschlossenen Tagesschächte für den Austritt von Gas aus der Grube (vgl. [Colenco 2006c]).

Primär-FEP	15.8	Verschlüsse der Tagesschächte
Variant-FEP	15.8.0.1	integraler hydraulischer Widerstand der Verschlüsse der Tagesschächte
Primär-FEP	15.9	Austritt von Lösung aus der Grube in das Hutgestein entlang FEP 15.8
Primär-FEP	15.10	Gasaustritt aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte
Primär-FEP	15.12	langzeitige Korrosion der Schachtverschlüsse durch $MgCl_2$ -untersättigte Lösung im Grubenhöchsten
Primär-FEP	15.13	mechanische Desintegration der Schachtverschlüsse

5.1.3.3 Wegsamkeit entlang nichtchloridischer Horizonte

Nichtchloridische Horizonte im Wirtsgestein mit nennenswerter Mächtigkeit sind der Hauptanhydrit (A3), die Anhydritmittel der Leine-Serie (am4 bis am7), der Rote Salzton der Aller-Serie (T4) und der Pegmatitanhydrit der Aller-Serie (A4).

Anhydrite sind im Vergleich zum umgebenden Salinar kompetenter. Bei der Bildung der Salzstruktur Asse wurden die kompetenten Bestandteile einerseits geklüftet, andererseits jedoch auch in einzelne Blöcke - der Hauptanhydrit in Schollen - zerbrochen, so dass das umgebende Salinar in die Zwischenräume eindringen und die Anhydritblöcke und -schollen hydraulisch voneinander trennen konnte.

Der Hauptanhydrit (A3) blieb im Bereich der Schachanlage Asse II bei der Bildung der Salzstruktur weitgehend an der Basis liegen. Im Grubengebäude wurden nur sehr vereinzelt tektonische Schollen angetroffen, und diesen wird eine geringe Ausdehnung zugewiesen. Hydraulische Verbindungen zwischen den tektonischen Schollen und Fließwegen am Salzspiegel sind im Bereich der Schachanlage Asse II auszuschließen.

Die Anhydritmittel unterteilen sich in mehrere Horizonte, welche durch Halit voneinander getrennt sind. Die Horizonte am4, am6 und am7 sind je ca. 1 – 1,5 m mächtig, die übrigen wesentlich geringmächtiger (1 – 10 cm). Sie sind im Grubengebäude nicht aufgeschlossen (vgl. auch Kapitel 5.1.2), potentielle hydraulische Verbindungen vom Grubengebäude zu am4, am6 und am7 bestehen lediglich entlang einiger Bohrungen, die allerdings alle vollständig mit Magnesia-Zement unterschiedlicher Zusammensetzung verfüllt sind [GSF 2002b]. Die Anhydritmittel reichen nur in der Nordflanke in größere Teufen. Sie kulminieren im Bereich der Schachanlage Asse II wenig unterhalb des Salzspiegels und keilen in der Südflanke deutlich oberhalb des Grubengebäudes aus, eventuell mit einer hydraulischen Verbindung zum Rötanhydrit (so1A) in der Südflanke. Es ist möglich, dass die Anhydritmittel zwischen Schacht Asse 2 und Schachanlage Asse I am Salzspiegel austreichen (vgl. auch Kapitel 5.1.2). Hydraulisch wirksame Wegsamkeiten entlang der Anhydritmittel über größere Distanzen können nicht ausgeschlossen werden. In einigen Bohrungen, die diese anschnitten, ging entweder Bohrspülung verloren oder es wurden zeitweise Lösungszutritte beobachtet [GSF 2003a]. Sofern die Verfüllung der einen oder anderen der genannten Bohrungen hydraulisch nicht dicht wäre, könnten die Anhydritmittel in Verbindung mit diesen Bohrungen einen Transportpfad vom Grubengebäude zum Salzspiegel bilden. Die Wahrscheinlichkeit für die Existenz eines solchen Pfades ist allerdings als sehr gering einzustufen, und der hydraulische Widerstand des Pfades wäre hoch.

Der Rote Salzton (T4) unterliegt zwar bei tektonischer Beanspruchung ebenfalls der Spröddeformation, ist beim Kontakt mit wässrigen Lösungen aber quellfähig. Hydraulische Wegsamkeiten entlang des Roten Salzton über nennenswerte Distanzen können deshalb ausgeschlossen werden.

Der Pegmatitanhydrit (A4) liegt im Hangenden der Anhydritmittel und somit – vom Grubengebäude aus – jenseits dieser potentiellen Wegsamkeiten. Hydraulische Wegsamkeiten im Pegmatitanhydrit über nennenswerte Distanzen können nach den derzeitigen Erkenntnissen nicht belastbar ausgeschlossen werden, und vereinzelte der oben erwähnten, verfüllten Bohrungen reichen vom Grubengebäude aus bis in diese Schicht. Den potentiellen Transportpfaden „Bohrung mit unwirksamer Verfüllung – Pegmatitanhydrit – Salzspiegel“ ist analog zum Weg entlang der Anhydritmittel eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit zuzuweisen.

Primär-FEP	15.14	hydraulische Wegsamkeiten und Lösungsfluss entlang Bohrung mit unwirksamer Verfüllung und entlang der Anhydritmittel bzw. des Pegmatitanhydrit zum Salzspiegel
------------	-------	--

5.1.3.4 WEGSAMKEIT ENTLANG KALIFLÖZEN IN VERBINDUNG MIT UMLÖSUNG

Kaliflöze können theoretisch in Verbindung mit Umlöseprozessen zu Wegsamkeiten im Wirtsgestein führen. In der Schachanlage Asse II liegt das Kaliflöz Staßfurt überall deutlich, 150 m oder mehr, unter dem Salzspiegel und streicht – wenn überhaupt – erst in einigem Abstand nordwestlich des Grubengebäudes am Salzspiegel aus.

Umlöseprozesse an Kaliflözen vom Salzspiegel aus sind an die Subrosion des umgebenden Halit gekoppelt, da die entstehende Lösung schwerer ist als NaCl-Lösung und deshalb die durch selektive Subrosion entstehenden Gerinne entlang der Kalisalzausstriche in der Tiefe begrenzt sind. Die Wirkung der flächigen Subrosion (am Halit) wird in Kapitel 5.2 diskutiert. Ein Umlösen entlang des Kaliflözes ist auch von der abgesoffenen Schachanlage Asse I gegen Asse II auszuschließen, da die Schachanlage Asse I in geringerer Tiefe liegt und der erwähnte Dichteeffekt auch hier wirkt.

Umlöseprozesse vom Grubengebäude aus sind durch das Einbringen des Schutzfluids ausgeschlossen. Selbst bei einem Volllaufen des Grubengebäudes durch natürlichen Lösungszutritt über die Südflanke liegt in größeren Teufen ausreichend Carnallit vor, so dass die Lösung bei Erreichen des Grubenhöchsten nur noch ein beschränktes Umlösepotential aufweisen dürfte. Ein Hochlösen des Kaliflözes Staßfurt aus der Grube bis zum Salzspiegel oder bis in die Schachanlage Asse I kann deshalb ausgeschlossen werden.

Primär-FEP	15.16	Entstehen von Wegsamkeiten im Kaliflöz Staßfurt durch Umlöseprozesse
------------	-------	--

5.1.3.5 WEGSAMKEITEN ENTLANG ALTEN BOHRUNGEN UND PERIPHEREN GRUBENBAUEN

Alte, ungenügend verschlossene Bohrungen sowie Grubenbaue, die bis zum Rand des Wirtsgesteins reichen, stellen eine weitere Art von potentiellen Wegsamkeiten im Wirtsgestein dar. Bei den Bohrungen ist zwischen solchen von der Oberfläche in die Salzstruktur und solchen aus dem Grubengebäude bis zum Rand der Salzstruktur bzw. bis zu den nichtchloridischen Schichten Anhydritmittel und Pegmatitanhydrit zu unterscheiden. Eine ausführliche Diskussion der Bohrungen enthält [GSF 2002b].

Bohrungen von der Oberfläche in die Salzstruktur:

- Bohrung R1

Die Bohrung R1 reicht bis auf eine Teufe von 688 m in das Grubengebäude hinein. Die Bohrung gilt laut den vorliegenden Unterlagen als hinreichend verschlossen, wobei das Verfüllmaterial nicht über die gesamte Länge bekannt ist. Im Grubengebäude verläuft die Bohrung R1 im Pfeiler 5/6 des Baufeldes in der Südflanke von der 490-m-Sohle bis zur 574-m-Sohle und setzt sich darunter außerhalb des Pfeilers fort. Auf der 595-m-Sohle wurde die Bohrung R1 mit Schussbohrlöchern angeschnitten; bei der letzten Befahrung im Jahre 1989 führte sie dort keine Salzlösung. Die Bohrung durchörtert die Anhydritmittel, die beim Abteufen 1896 lösungsführend angetroffen wurden. Die Bohrung R1 stellt eine sehr wenig wahrscheinliche potentielle

Wegsamkeit mit begrenzter Transmissivität vom Grubengebäude zum Salzspiegel und in das verstürzte Deckgebirge dar.

- Bohrungen R2 und R3
Die Bohrungen R2 und R3 wurden an der Nordflanke von der Tagesoberfläche aus durch das verstürzte Deckgebirge in das Wirtsgestein niedergebracht. Sie sind durch 50 m mächtige Sicherheitspfeiler aus ungestörtem Steinsalz umgeben und haben keine direkte hydraulische Verbindung zum Grubengebäude. Ihr Verfüllgrad und das Verfüllmaterial sind weitgehend unbekannt. Die Bohrungen R2 und R3 durchörtern die Schichten Anhydritmittel (am4 bis am7) und Pegmatitanhydrit, welche ihrerseits aus dem Grubengebäude her erbohrt wurden. Theoretisch sind damit indirekte Wegsamkeiten aus dem Grubengebäude in die Biosphäre gegeben.

Bohrungen aus dem Grubengebäude bis zur Südflanke der Salzstruktur:

- von der 490-m- und der 532-m-Sohle aus reichen vier Bohrungen bis in den Rötanhydrit (so1A) und den Ton-/Mergelstein (so1T) in der Südflanke. Die Bohrungen sind mit Magnesia-Zement verfüllt. Wenn diese Bohrungen hydraulisch wirksam wären, könnten ihre Auswirkungen in jene der unterstellten Wegsamkeiten FEP 15.6 eingeschlossen werden.
- Bohrung 68/775:
Die Bohrung reicht von der südlichen Richtstrecke nach Westen bis in den Rötanhydrit (so1A). Sie ist ebenfalls mit Magnesia-Mörtel verfüllt.
- Bohrungen 17/750 und 38/750:
Beide Bohrungen führen vom 3. westlichen Querschlag in das Rötsteinsalz (17/750: so1Na) bzw. den Rötanhydrit (38/750: so1A). Sie sind ebenfalls mit Magnesia-Mörtel verfüllt.

Periphere Grubenbaue gegen die Südflanke der Salzstruktur:

- Hornstatt des Blindschachtes 2:
Die Hornstatt von Blindschacht 2 endet oberhalb der 553-m-Sohle im Rötsteinsalz (so1Na). Die verbleibende Mächtigkeit des Rötsteinsalzes beträgt wenige Meter. Bei einer hydraulischen Verbindung zum Rötanhydrit wäre ihre Wirkung vergleichbar zu jener der Bohrungen von der 532-m-Sohle aus und in FEP 15.6 einzuschließen.
- Strecke aus Abbau 3/750 (Na3) nach Süden:
Diese Strecke endet ebenfalls im Rötsteinsalz, das hier nur wenige Meter mächtig ist. Die Strecke wird im Zuge der Schließungsmaßnahmen mit einer Strömungsbarriere versehen.

Entlang keiner dieser Bohrungen oder Grubenbaue wurden bislang Zutritte von Wässern beobachtet.

Bohrungen aus dem Grubengebäude mit Kontakt zu nichtchloridischen Schichten in der Nordflanke:

- Verschiedene Bohrungen führen aus dem Grubengebäude in die Anhydritmittel und / oder den Pegmatitanhydrit der Nordflanke [GSF 2002b]. Sie sind alle mit Magnesia-Mörtel unterschiedlicher Zusammensetzung verfüllt. Für die Langzeitsicherheit sind diese Bohrungen höchstens in Verbindung mit Wegsamkeiten in den nichtchloridischen Schichten Anhydritmittel und Pegmatitanhydrit von Bedeutung (FEP 15.14). Die Existenz von solchen Verbindungen setzt sowohl das Versagen der Bohrlochverfüllung als auch den Anschluss der Bohrung an eine weitreichende hydraulische Wegsamkeit in den Anhydritschichten voraus. Solche Verbindungen

sind deshalb sehr gering wahrscheinlich und würden einen relativ hohen hydraulischen Widerstand aufweisen.

Neben den in Abschnitt 5.1.3.3 erwähnten Wegsamkeiten FEP 15.14 und den durch FEP 15.6 abgedeckten Wegsamkeiten ergeben sich durch alte Bohrungen und periphere Grubenbaue somit die nachfolgend aufgeführten potentiellen Wegsamkeiten vom Grubengebäude durch die Steinsalz-Barriere in das Hutgestein oder das Deckgebirge. Die Leitfähigkeiten dieser Wegsamkeiten sind als sehr gering einzustufen, und signifikante langzeitige Veränderungen durch geomechanische oder Lösungs- bzw. Umlösungsprozesse können ausgeschlossen werden. Die nachfolgend aufgeführten potentiellen Wegsamkeiten sind deshalb für den Nachweis der Langzeitsicherheit vernachlässigbar.

Primär-FEP	15.17	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss entlang der Tiefbohrung R1
Primär-FEP	15.18	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss entlang Bohrung in die Nordflanke mit unwirksamer Verfüllung, anschließend entlang der Anhydritmittel bzw. des Pegmatitanhydrit und dann entlang einer der Tiefbohrungen R1, R2 oder R3
Primär-FEP	15.19	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss von der Grube in den so1A der Südflanke entlang einer der drei verfüllten Bohrungen auf der 775-m- bzw. 750-m-Sohle
Primär-FEP	15.20	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss von der Grube in den so1A entlang der mit einer Strömungsbarriere versehenen Strecke aus der Kammer 3/750 nach Süden

Die eventuelle Entstehung von weiteren Wegsamkeiten im Wirtsgestein und die Veränderungen der oben aufgeführten Wegsamkeiten im Laufe der Zeit werden in Kapitel 5.2 diskutiert.

5.1.4 Transport von Radionukliden im Hutgestein und Deckgebirge

5.1.4.1 Randbedingungen

Aufgrund der Diskussion der Wegsamkeiten im Wirtsgestein (Kapitel 5.1.3) ist für die Identifikation der potentiellen Transportpfade im Hutgestein und Deckgebirge von einem Übertritt von kontaminierter Lösung in den Rötanhydrit (so1A) der Südflanke in einer Tiefe zwischen 500 m, evtl. 474 m, und 574 m (FEP 15.6) auszugehen. Ein Lösungsaustritt entlang anderer Wegsamkeiten ist vernachlässigbar gering. Alternative Übertrittsorte können deshalb – außer aufgrund der Langzeitentwicklung des Standortes (Kapitel 5.2) – ausgeschlossen werden.

Die entsprechenden FEP sind

Primär-FEP	15.7	Austritt von Lösung aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
------------	------	--

Transport-FEP	15.7.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
Transport-FEP	15.7.2	diffusiver Radionuklidtransport aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
Transport-FEP	15.9.1	Transport gelöster Radionuklide entlang FEP 15.8

Der Übertritt von Radionukliden aus dem Grubengebäude ins Deckgebirge erfolgt durch Auspressen von kontaminierter, $MgCl_2$ -reicher Lösung, d.h. einer Lösung, deren Dichte mit rund $1'300 \text{ kg/m}^3$ deutlich höher ist als jene des Porenwassers im Deckgebirge, das eine Dichte von rund $1'200 \text{ kg/m}^3$ aufweist. Dies bedeutet, dass die ausgepresste Lösung die Tendenz hat, in die Tiefe abzusinken, sofern Wegsamkeiten dies erlauben. Beim Kontakt von Lösung aus dem Grubengebäude mit Deckgebirgslösung treten Mineralausfällungen auf, wodurch sich die Dichte der Mischlösung gegenüber der sich anteilig aus den Ausgangsdichten berechneten „Mischdichte“ verringert [Voigt 2003]. Mit kleiner werdendem Dichteunterschied zwischen radionuklidhaltiger Lösung und unbeeinflusster Deckgebirgslösung nehmen die Dichteeffekte beim Radionuklidtransport ab. Mit den Mineralausfällungen können auch Radionuklide aus der Lösung ausfallen, wodurch die Radionuklidkonzentration in Lösung zusätzlich zur Wirkung der Verdünnung abnimmt. Die Auswirkungen der Ausfällungen auf die Radionuklidkonzentration aber auch auf eine eventuelle Verringerung der Durchlässigkeit von Transportpfaden können jedoch nicht quantifiziert werden. Mit fortschreitender Zeit und fortlaufender Auspressung von Lösung aus der Grube entfernt sich die reaktive Zone der Ausfällungen vom Ort des Übertritts in das Deckgebirge.

Primär-FEP	20.6	Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung im Wirtsgestein und im Deckgebirge
Variant-FEP	20.6.0.1	Änderung der Dichte der aus dem Grubengebäude austretenden Lösung durch Mischung mit Deckgebirgslösung und Mineralausfällungen
Transport-FEP	20.6.1	Verminderung der Radionuklidkonzentration bei der Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung
Transport-FEP	20.6.2	Ausfällung von Radionukliden bei der Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung
Primär-FEP	20.7	natürliche Grundwasserbewegung im Deckgebirge und Hutgestein
Transport-FEP	20.7.1	Ausbreitung der kontaminierten Lösung im Deckgebirge/Hutgestein mit Dichteeinwirkung
Variant-FEP	20.7.1.1	Änderung der Dichte der kontaminierten Lösung während der Ausbreitung im Deckgebirge/Hutgestein durch Mischung mit unbeeinflusstem Porenwasser

Das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude beginnt, sobald der Fluiddruck im Grubengebäude den Porenwasserdruck im Deckgebirge am Ort der Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere (FEP 20.26.0.2) – in guter Näherung der hydrostatische Druck – übersteigt. Das Deckgebirge setzt dem Auspressen von Lösung aus der Grube einen hydraulischen Widerstand entgegen. Dadurch steigt der Lösungsdruck im Deckgebirge nahe der Übertrittsstelle FEP 15.6 hydrodynamisch an, abhängig von der Auspressrate. Da die Grubenlösung eine höhere Viskosität als die Deckgebirgslösung aufweist, hängt der hydraulische Widerstand, den das Deckgebirge gegen das Auspres-

sen von Lösung ausübt, von der Verteilung der bisher ausgepressten Grubenlösung im Deckgebirge ab. Die Rate der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude ist in der mittleren Nachbetriebsphase relativ hoch (einige $100 \text{ m}^3/\text{a}$) und sinkt dann im Verlauf der Zeit auf wenige m^3/a ab [IfG 2006b] [ALSA-C 2005a].

Variant-FEP	20.5.0.2	hydraulischer Druck in der mittleren und späten Nachbetriebsphase am Ort von FEP 15.6 (zeitabhängig)
Variant-FEP	20.5.0.4	integraler hydraulischer Widerstand des Deckgebirges gegen Lösungsauspressung aus der Grube entlang FEP 15.6

Die austretende Lösung ist jedoch nicht von Beginn an mit Radionukliden kontaminiert, da die wirksamen hydraulischen Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere (FEP 15.6) nicht in eine Einlagerungskammer führen. Die Ausbreitungsprozesse im Grubengebäude, unterstützt durch die technischen Maßnahmen zum Verschluss der Schachanlage Asse II, verzögern den Transport von Radionukliden von den Einlagerungskammern zur Wegsamkeit durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere ins Deckgebirge [Colenco 2006c]. Nach den Modellrechnungen zum Radionuklidtransport im Grubengebäude liegt diese Verzögerung in der Größenordnung von einigen 1'000 Jahren [ALSA-C 2005a].

Variant-FEP	20.7.1.2	lokale Erhöhung der Porenwasserdichte im Deckgebirge durch das Auspressen von unkontaminiertem Schutzfluid vor dem Austreten von Radionukliden
-------------	----------	--

Nach dem Austreten der Radionuklide aus dem Grubengebäude in den Rötanhydrit (so1A) der Südflanke ist für die Ausbreitungspfade der Radionuklide im Deckgebirge wesentlich, ob der Druck (FEP 20.5.0.2), mit der die kontaminierte Lösung ins Deckgebirge eingepresst wird, ausreicht, um diese entgegen der Dichtewirkung nach oben gegen den Salzspiegel zu bewegen, oder ob ausreichend hydraulische Wegsamkeiten im Streichen des Rötanhydrit und schichtquerend durch den Rötäquitard bestehen, um die kontaminierte Lösung in den Muschelkalkaquifer zu führen.

Die Modellrechnungen zur Ausbreitung von ausgepresster Grubenlösung im Deckgebirge zeigen, dass der Anstieg der Grubenlösung im Rötanhydrit und das Erreichen des Salzspiegels wesentlich von der Auspressrate und deren zeitlichem Verlauf abhängen [Colenco 2006b]. Es ist davon auszugehen, dass Grubenlösung und in beschränktem Umfang auch Radionuklide bis in das verstürzte Deckgebirge (Kompartiment 21) gelangen.

In Bezug auf die hydraulischen Wegsamkeiten im Deckgebirge hängen die Ausbreitungspfade somit von den selben FEP ab wie der Lösungszutritt (Kapitel 5.1.2). Von Bedeutung sind zudem

Variant-FEP	20.7.0.1	hydraulische Druckdifferenz zwischen dem Muschelkalk in der Südflanke einerseits und dem gut durchlässigen Bereich des Kompartiments 21 andererseits
Variant-FEP	22.1.0.4	Kluft- und zugängliche Matrixporosität des bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit so1A

Ein Abfluss des ausgepressten Schutzfluids im Rötanhydrit (so1A) nach unten ist denkbar, wird jedoch aufgrund der mit der Teufe wahrscheinlich stark abnehmenden

Permeabilität dieser Einheit nicht weiter betrachtet (Weglassen einer für die Langzeitsicherheit günstigen Alternative). Bei der Bewertung des Dichteeffektes, der das Hochpressen der kontaminierten Lösung gegen den Salzspiegel behindert, ist die erhöhte Dichte des Porenwassers im Deckgebirge in der Umgebung des Auspressortes zu bedenken, die durch das vorgängige Auspressen von nicht kontaminierter $MgCl_2$ -Lösung verursacht wird (FEP 20.7.1.2).

Im Folgenden werden die möglichen Ausbreitungspfade im Deckgebirge und Hutgestein für ein Auspressen von kontaminierter Lösung an der SW-Flanke aufgeführt und diskutiert. Eine Übersicht dazu enthält Kapitel 5.1.5. Schematische Darstellungen der möglichen Ausbreitungspfade enthalten die Abbildungen 5-1a, 5-1b und 5-2.

Selbst bei einem hypothetischen, nicht zu unterstellenden direkten Auspressen am Salzspiegel würden sich keine neuen Pfade ergeben, lediglich deren Bedeutung wäre anders. Dies gilt, da bei der Analyse der potentiellen Ausbreitungspfade ein Hochpressen von kontaminierter Lösung im Rötanhydrit bis in das Hutgestein und das verstärzte Deckgebirge als Möglichkeit einbezogen wird.

5.1.4.2 Pfad mit Hochpressen der Grubenlösung entlang des Rötanhydrit zum Salzspiegel und Transport nach Groß Denkte

Bei relativ hoher und lang anhaltender Auspressrate und dem damit verbundenen Druckanstieg gegenüber dem ungestörten Porenwasserdruck im Deckgebirge an der Auspressstelle und bei ungenügenden alternativen Wegsamkeiten wird die ausgepresste Lösung entlang des Rötanhydrit, möglicherweise oberhalb des hydraulischen Kontakts auch entlang der Anhydritmittel, gegen den Salzspiegel hochgepresst. Als Transportpfade stehen die als untergeordnet eingestuftes Wegsamkeiten des heutigen Lösungszutritts „Rötanhydrit“ und „Anhydritmittel-Rötanhydrit“ (vgl. Kapitel 5.1.2) zur Verfügung. Wie dort bereits erwähnt, wird die Existenz einer Wegsamkeit entlang der Anhydritmittel – obwohl als unwahrscheinlich einzustufen – für jedes Szenario unterstellt. Aufgrund von Dichte- und Viskositätseffekten ist die relative Bedeutung der einzelnen Pfade für die Ausbreitung von Grubenlösung anders als beim heutigen Lösungszutritt in die Grube.

Wesentlich für die Ausbreitung der ausgepressten Grubenlösung sind gleichwohl die maßgebenden FEP des heutigen Lösungszutritts und die zugehörigen Variant-FEP, insbesondere die FEP des geogen beanspruchten Rötanhydrit außerhalb der bergbaubedingten Auflockerung (FEP 22.2). Ebenfalls von großer Bedeutung ist der hydraulische Anschluss zwischen dem Rötanhydrit und dem verstärzten Deckgebirge/Hutgestein (Kompartiment 21) sowie die hydraulischen Verhältnisse und Wegsamkeiten in diesem Kompartiment.

Variant-FEP	21.2.0.2	hydraulischer Kontakt zwischen dem Rötanhydrit und dem Kompartiment 21
Transport-FEP	22.5.1	schichtparalleler Transport im Rötanhydrit im Bereich der bergbaubedingten Auflockerung mit Dichteeinwirkung
Transport-FEP	22.5.3	Hochpressen des größten Teils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit bis ins Kompartiment 21
Transport-FEP	15.25.1	Hochpressen eines mit FEP 22.5.3 vergleichbaren Anteils der in das Deckgebirge austretenden kon-

taminierten Grubenlösung entlang der Anhydritmittel bis ins Kompartiment 21

Langzeitig werden sich die Subrosionsgerinne in Folge der fortschreitenden Subrosion weiter nach SE ausdehnen (vgl. Kapitel 5.2.2). Ob der Prozess jedoch quantitativ von Bedeutung ist, kann z.Z. nicht bewertet werden.

Primär-FEP	21.3	Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE durch fortschreitende Subrosion
------------	------	---

Das Hochpressen der aus der Grube ausgepressten Lösung in leitfähige Bereiche des verstützten Deckgebirges oder Hutgesteins braucht nicht im Fallen des Rötanhydrit zu erfolgen, sondern kann mit einer Bewegung gegen NW oder SE verbunden sein. Dies wird durch den Ort bestimmt, wo der hydraulische Kontakt (FEP 21.2.0.2) gut ist, sowie durch die Permeabilitäten im Rötanhydrit (FEP 22.1.0.3 und 22.2.0.1), in dessen Verkarstungszone nahe des Salzspiegels (FEP 22.3, FEP 22.2.0.2) und im Kompartiment 21 (FEP 21.2.0.1). Beim schichtparallelen Transport im Rötanhydrit wird sich die Grubenlösung mit unkontaminiertem Porenwasser vermischen.

Transport-FEP	22.5.2	schichtparalleler Transport im geogen beanspruchten Rötanhydrit mit Dichteeinwirkung
---------------	--------	--

Primär-FEP	22.6	Vermischung mit unkontaminiertem Porenwasser im Rötanhydrit
------------	------	---

Variant-FEP	22.6.0.1	Verdünnungsrate im Rötanhydrit
-------------	----------	--------------------------------

Im verstützten Deckgebirge/Hutgestein wird die hochgepresste Lösung vom dort herrschenden Grundwasserfluss erfasst (FEP 21.2) und weitertransportiert. Dies kann gegen NW erfolgen. Allerdings steigt der Salzspiegel vom Schacht Asse 2 gegen die Schachanlage Asse I an. Zudem existiert – nicht notwendigerweise gebunden an diesen Umstand – irgendwo im Bereich zwischen Schacht Asse 2 und Schachanlage Asse I eine unterirdische Wasserscheide der Grundwasserzirkulation im verstützten Deckgebirge. Eine solche Grundwasserscheide ist glaubhaft, da der Grundwasserfluss im verstützten Deckgebirge nordwestlich vom Schachanlage Asse I nachgewiesenermaßen gegen NW gerichtet ist, während das Grundwasser südöstlich des Schachtes Asse 2 aufgrund der topographischen Verhältnisse wahrscheinlich gegen SE abfließt.

Maßgebend für den Ausbreitungspfad sind deshalb der Ort der unterirdischen Grundwasserscheide an der Basis des Kompartiments 21 und der Ort des Lösungsübertritts vom Rötanhydrit ins Kompartiment 21. Sofern der Übertritt NW der unterirdischen Grundwasserscheide erfolgt, breiten sich die Radionuklide im Kompartiment 21 gegen NW, Richtung Groß Denkte aus.

Transport-FEP	21.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung in strukturparalleler Richtung gegen Groß Denkte
---------------	--------	---

Primär-FEP	21.4	unterirdische Wasserscheide der Grundwasserzirkulation im Kompartiment 21 bezüglich NW-SE-licher Fliessrichtung
------------	------	---

Variant-FEP	21.4.0.1	Ort der unterirdischen Grundwasserscheide
-------------	----------	---

Sofern der Übertritt der hochgepressten Lösung ins Kompartiment 21 jedoch südöstlich der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) erfolgt, ist der anschließende Transport gegen SE gerichtet und führt zu anderen Transportpfaden (Kapitel 5.1.4.5).

Während des Abflusses gegen NW vermischt sich die Lösung mit Grubenlösungsanteilen weiter mit unkontaminierter Lösung aus dem verstückelten Deckgebirge/Hutgestein, speziell in den Subrosionsgerinnen. Dabei nimmt die Dichte der potentiell kontaminierten Lösung weiter ab (FEP 20.7.1.1) und es können Mineralausfällungen und dadurch zusätzlich eine Abnahme der Radionuklidkonzentration eintreten. Im Bereich von Groß Denkte befinden sich die bis hierher transportierten Radionuklide dadurch in weitgehend gesättigter NaCl-Lösung mit untersättigtem $MgCl_2$ -Gehalt in der Nähe des Salzspiegels.

Primär-FEP	21.5	Vermischung der Lösung mit unkontaminierten Salzwässern im Kompartiment 21
Variant-FEP	21.5.0.1	Verdünnungsrate bis Groß Denkte (Basis Kompartiment 21)

Im Bereich von Groß Denkte verläuft eine Störungszone, so dass eine erhöhte hydraulische Permeabilität von der Geländeoberfläche bis zur Basis des Kompartimentes 21 zu unterstellen ist. Gleichzeitig tauchen die relativ durchlässigen Schichten der Salzstrukturflanken in größere Tiefen ab, verbunden mit einer Abnahme ihrer Permeabilität. Dies bewirkt einen Rückstau des Grundwasserflusses gegen Westen und führt zum Austritt von Quellen. Die hydraulischen Druckverhältnisse, bestimmt durch die Höhe des Grundwasserspiegels im Infiltrationsgebiet auf dem Asse Höhenzug und die Höhe des Exfiltrationsgebietes bei Groß Denkte (insbesondere der dort austretenden Salzquellen), ermöglicht jedoch nicht, dass konzentrierte NaCl-Lösung bis zur Geländeoberfläche gelangt. Zum Transport bis zur Geländeoberfläche ist eine weitere Verdünnung mit Süßwasser oder gering salzhaltigem Wasser erforderlich. Diese für das Hochschleppen von potentiell radionuklidhaltiger Lösung erforderliche Verdünnung ist somit auch von der Höhendifferenz zwischen dem Asse Höhenzug und dem Exfiltrationsort abhängig. Sofern diese Höhendifferenz durch Erosion langfristig abnimmt (vgl. Kapitel 5.2), muss die Verdünnung als Voraussetzung für einen Transport zur Geländeoberfläche zunehmen. Bei einer fehlenden advektiven Transportkomponente bewirkt nur noch Diffusion einen langsamen Aufstieg der Radionuklide zur Geländeoberfläche.

Variant-FEP	21.2.0.3	langzeitige Abnahme der Höhendifferenz zwischen der Infiltrationszone auf dem Asse Höhenzug und der Exfiltrationszone bei Groß Denkte
Variant-FEP	21.5.0.2	Verdünnungsrate im Raum Groß Denkte von der Basis des Kompartiments 21 bis zur Geländeoberfläche
Transport-FEP	21.2.3	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte

Die Freisetzung in die Biosphäre erfolgt somit entweder über eine salzhaltige Quelle (mit beschränktem direktem Transfer in Lebensmittel aufgrund des Salzgehaltes) oder, in Verbindung mit einer weiteren Verdünnung, in einen nutzbaren Grundwasserträger mit geringem Salzgehalt. Die Verdünnungsrate ist dabei stark abhängig vom Ort des Übertritts in den oberflächennahen Grundwasserträger.

Primär-FEP	29.1	Grundwasserfluss und Grundwasserumsatz im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger
------------	------	---

Transport-FEP	29.1.1	Freisetzung von Radionukliden in den oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger
Primär-FEP	29.2	Verdünnung im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger
Variant-FEP	29.2.0.1	Verdünnungsrate im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger

Der Radionuklidtransport entlang des hier beschriebenen Pfades erfolgt zunächst im Rötanhydrit, möglicherweise in den Anhydritmitteln, dann im verstückelten Deckgebirge/Hutgestein mit schwer zu prognostizierender Lithologie, anschließend in den Subrosionsgerinnen und zum Schluss in der Störungszone von Groß Denkte. Eine Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption⁸ ist dabei kaum prognostizierbar und deshalb nicht zu unterstellen.

Variant-FEP	22.5.1.1	Sorption im bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit
Variant-FEP	22.5.2.1	Sorption im Rötanhydrit außerhalb des bergbaubedingt aufgelockerten Bereiches
Variant-FEP	21.2.1.1	Sorption im verstückelten Deckgebirge im Bereich der Subrosionsgerinne
Variant-FEP	21.2.3.1	Sorption zwischen der Basis des Kompartiments 21 und der Geländeoberfläche im Raum Gross Denkte

5.1.4.3 Pfade mit ausgeprägtem Anteil im Rötanhydrit

Sofern der Rötanhydrit (Kompartiment 22) ausreichend leitfähig ist, kann sich die ausgepresste Grubenlösung in dieser Einheit schichtparallel über größere Distanzen ausbreiten (FEP 22.5.2). Da die dabei auftretenden Filtergeschwindigkeiten geringer sein dürften als beim direkten Hochpressen gegen den Salzspiegel (Pfad Kapitel 5.1.4.2), wird hier der natürliche Grundwasserfluss im Rötanhydrit von Bedeutung sein: Der Grundwasserfluss im Rötanhydrit kann – unbeeinflusst von Lösungszutritten oder -austritten aus der Schachanlage Asse II – sowohl nach oben als auch nach unten, gegen NW oder gegen SE gerichtet sein. Der natürliche Grundwasserfluss bestimmt die Ausbreitung der Radionuklide im Kompartiment 22 umso stärker, je größer die Entfernung vom Auspressort und je kleiner der durch die Auspressung verursachte hydraulische Gradient ist.

Primär-FEP	22.5	Grundwasserfluss im Rötanhydrit
Variant-FEP	22.5.0.1	Änderung des hydraulischen Gradienten im Rötanhydrit durch das Auspressen von Grubenlösung

Im Folgenden werden die Pfade diskutiert, die über größere Distanzen im Rötanhydrit verlaufen.

⁸ Die Abhängigkeit der Sorption von der chemischen Zusammensetzung der Lösung (insbesondere dem pH-Wert) und dem sorbierenden Material sowie die sorptionshemmende Wirkung durch Komplexbildner oder Kolloide wird für die Szenarienentwicklung Geosphäre implizit mit dem Begriff Sorption berücksichtigt. Entsprechende FEP werden nicht explizit aufgelistet. Dies gilt auch für alle anderen Kompartimente, bei denen Sorption angesprochen wird.

Bei einer Ausbreitung Richtung NW können zwei Fälle unterschieden werden, der Transport bis in eine Exfiltrationszone des Rötanhydrit, zu unterstellen im Raum Groß Denkte, oder der Übertritt und Weitertransport in den Störungszonen von Wittmar. Der letztgenannte Fall wird in den Kapiteln 5.1.4.4 und 5.1.4.6 weiter diskutiert.

Im Nahbereich des Auspressortes wird der schichtparallele Transport durch die bergbaubedingte Auflockerung erleichtert. Außerhalb dieser Zone wird der Pfad durch die Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit (FEP 22.2.0.1) bestimmt. Ein schichtparalleler Transport im Rötanhydrit über größere Distanzen setzt voraus, dass diese Schicht nirgends durch Störungen derart versetzt ist, dass der Grundwasserfluss längs der Asse-Struktur unterbrochen wird. Da der Rötanhydrit mit rund 20 m relativ geringmächtig ist, sind weitreichende Transportpfade besonders in der stark gegliederten SW-Flanke wenig wahrscheinlich.

Variant-FEP	22.5.0.2	Unterbruch des schichtparallelen Grundwasserflusses im Rötanhydrit durch Versatz an Störungen
Transport-FEP	22.5.4	weitreichender schichtparalleler Transport im Rötanhydrit (W Einschnitt Wittmar bzw. E Einschnitt Ammerbeek)

Bei einer Ausbreitung Richtung SE können die analogen zwei Fälle unterschieden werden, der Transport bis in eine Exfiltrationszone des Rötanhydrit, in diesem Fall vermutlich zu unterstellen im Raum Barnstorf, oder Übertritt und Weitertransport in der Quer- und Diagonalstörung von Ammerbeek. Der letztgenannte Fall wird ebenfalls in den Kapiteln 5.1.4.4 und 5.1.4.6 weiter diskutiert.

Die oben angeführten Aussagen zum Transportpfad im Rötanhydrit Richtung Groß Denkte gelten sinngemäß auch für die Ausbreitung gegen SE. Die Transportdistanz bis Barnstorf ist größer, die Wahrscheinlichkeit eines durchgehenden Pfades im geringmächtigen Rötanhydrit entsprechend noch geringer.

5.1.4.4 Pfade durch den Rötäquitard in der Südflanke

Von der bergbaubedingten Auflockerungszone im Rötanhydrit so1A (FEP 22.1), in welche Grubenlösung und potentiell Radionuklide aus der Grube ausgepresst werden, führt der Scherdeformationsbereich S3/D9 (FEP 23.1) mit direktem hydraulischen Kontakt schräg nach Süden ansteigend durch den Rötäquitard in den Muschelkalk. Nach einem mehr oder weniger langen Transportabschnitt in streichender Richtung entlang des Rötanhydrit (Pfade gemäß Kapitel 5.1.4.3) gelangt ausgepresste Grubenlösung zudem an Orte, wo weitere hydraulische Wegsamkeiten durch den Rötäquitard (so2-so4) bestehen können. Eine solche Wegsamkeit stellt insbesondere die Querstörung der Ammerbeek dar, da diese vermutlich in direktem hydraulischen Kontakt mit der Zone des bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit (FEP 22.1) steht. In größerer Entfernung von der Übertrittsstelle aus dem Grubengebäude sind es die Diagonalstörung der Ammerbeek, die Querstörungen von Wittmar und weitere, nicht spezifizierte Störungen (Fließsystem V gemäß [Colenco 2006a]) (FEP 23.2).

Die bergbaubedingte Auflockerung im Rötäquitard (FEP 23.1) ist gegen die Geländeoberfläche begrenzt, entsprechende Flüsse durch den Rötäquitard führen damit in den Muschelkalk, nicht jedoch direkt in die Biosphäre. Die Pfade, die auf einem Übertritt in den Muschelkalk beruhen, werden in Kapitel 5.1.4.6 weiter diskutiert.

Transport-FEP	23.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Radionuklidtransport durch den bergbaubedingt aufgelockerten Rötäquitard
---------------	--------	--

tard (so2-so4) mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße

Die Diagonal- bzw. Querstörungen der Ammerbeek und von Wittmar, wie auch die anderen, nicht näher spezifizierten Störungen des Fließsystems V (vgl. [Colenco 2006a]), reichen stratigraphisch bis in die Kreide. Transportpfade können somit in den Muschelkalk (Kapitel 5.1.4.6, FEP 23.2, 23.2.0.1), ins Rhät und auch direkt in die oberflächennahen Grundwasserleiter (Kompartiment 29) führen.

Primär-FEP	25.1	Wegsamkeiten im Kompartiment 25 (vorwiegend entlang Störungszonen)
------------	------	--

Die möglichen Exfiltrationsgebiete für die letztgenannten Pfade, d.h. die direkte Freisetzung von Radionukliden entlang Querstörungen in einen oberflächennahen Grundwasserleiter, werden durch die Erstreckung der Querstörungen in die Remlinger Mulde, die Eintiefung des Quartärs entlang der Störungen sowie die Höhenlage der potentiellen Exfiltrationsgebiete im Vergleich zur (dichtebereinigten) Druckspiegelhöhe im Röt-anhydrit bestimmt, wobei letztere durch das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude zeitweilig lokal erhöht ist.

Sowohl die Querstörungen von Wittmar als auch die Störungen der Ammerbeek sind an der Geländeoberfläche von eingetieften quartären Rinnen begleitet. Diese können Lösung, die entlang der Störung hochgeschleppt wird, aufnehmen und über deren Erstreckung hinaus gegen SW führen. Die Tiefenerstreckung der Quartärrinnen ist nicht in allen Fällen bekannt, dürfte aber im Bereich von bis zu ca. 20 m liegen.

Primär-FEP	29.3	Quartärrinnen entlang von Quer- und Diagonalstörungen
Variant-FEP	29.3.0.1	Tiefenerstreckung der Quartärrinnen
Transport-FEP	29.3.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang von Quartärrinnen

Die Transportpfade mit nennenswertem Anteil entlang Störungen lassen sich somit zusammenfassend wie folgt beschreiben: Vom Rötanhydrit (Kapitel 5.1.4.3) entlang schichtquerender Wegsamkeiten im Rötquitard (FEP 23.2) in das Quartär (bzw. in die Kreide der Remlinger Mulde), ggf. in eine quartäre Rinne (FEP 29.3) und an die Oberfläche. Pfade, die solcherart bis in das Verbreitungsgebiet der Kreide reichen, setzen voraus, dass der Muschelkalk am Ort, wo der Pfad diesen quert, Exfiltrationsgebiet ist, d.h. dass der Grundwasserfluss im Muschelkalk aufwärts und nicht abwärts gerichtet ist. Dies ist nach den Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung bei den oben genannten Störungen bis in einige Teufe der Fall [Colenco 2006b].

Primär-FEP	24.1	Grundwasserfluss im Muschelkalkaquifer
Variant-FEP	24.1.0.1	Exfiltrations- und Infiltrationsverhältnisse im Bereich der Störungen von Wittmar und Ammerbeek

Verdünnung entlang dieser Pfade findet in unterschiedlichem Ausmaß im Rötanhydrit (FEP 22.6), im Muschelkalk (FEP 24.2) und im Quartär bzw. in der Kreide der Remlinger Mulde (FEP 29.2) statt, im Rötquitard kann eine solche aufgrund der selbst in Störungszonen geringen Leitfähigkeit vernachlässigt werden.

Primär-FEP	24.2	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Muschelkalkaquifer
Variant-FEP	24.2.0.1	Verdünnungsrate im Muschelkalkaquifer

Die für diese Pfade relevanten Transport-FEP sind, entsprechend der maßgebenden Wegsamkeit im Röttaquitard (so2 - so4)

Transport-FEP	23.2.1	Transport entlang schichtquerender Störungen im Röttaquitard mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
Transport-FEP	24.1.1	schichtquerender Transport im Muschelkalkaquifer entlang Störungszonen mit Dichteeinwirkung
Transport-FEP	25.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Kompartiment 25 mit Dichteeinwirkung

Entlang dieser Transportpfade kann von einer Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption im tonhaltigen Röttaquitard, im Muschelkalkaquifer und ggf. im Keuper ausgegangen werden.

Variant-FEP	23.1.1.1	Sorption im Röttaquitard
Variant-FEP	24.1.1.1	Sorption im Muschelkalkaquifer
Variant-FEP	25.1.1.1	Sorption im Kompartiment 25

Ob die oben beschriebenen Pfade durch den Röttaquitard in der Südflanke für die Langzeitsicherheit von Bedeutung sind, hängt neben den aufgeführten FEP wesentlich von den hydrogeologischen Verhältnissen zwischen dem Muschelkalk in der Südflanke, dem Röt und dem verstürzten Deckgebirge ab. Nach dem Austritt aus dem Röttaquitard vermischt sich die mittlerweile bereits etwas verdünnte Grubenlösung, die aufgrund ihres erhöhten $MgCl_2$ -Gehaltes immer noch schwerer als das ungestörte Grundwasser ist, zunehmend mit diesem. Dabei nimmt die Dichte der potentiell kontaminierten Lösung stetig ab. Der Dichteeffekt wirkt einem Hochschleppen der Radionuklide entlang kurzer Wege entgegen. Die Transportpfade im Muschelkalk werden in Kapitel 5.1.4.6 weiter diskutiert.

5.1.4.5 Pfade ausgehend vom verstürzten Deckgebirge SE der Grundwasserscheide

Weitere Pfade mit relevantem Anteil entlang einer Störungzone sind zu betrachten, falls der Pfad „Rötanhydrit – verstürztes Deckgebirge/Hutgestein“ (Kapitel 5.1.4.2) in ein Gebiet des Kompartimentes 21 führt, das südöstlich der dortigen unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) liegt. In diesem Fall erfolgt der Transport im Kompartiment 21 zunächst in östlicher bis südlicher Richtung.

Transport-FEP	21.2.2	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung zwischen der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) und dem Bereich Gr. Vahlberg
Variant-FEP	21.2.2.1	Sorption im verstürzten Deckgebirge SE der Subrosionsgerinne

Es sind fünf weiterführende Pfade zu diskutieren:

- (1) nach kurzem Transport im verstürzten Deckgebirge zur Geländeoberfläche im Bereich des Geländeeinschnitts der Störungen der Ammerbeek und von Groß Vahlberg
- (2) in die Diagonalstörung von Groß Vahlberg
- (3) in die Querstörung oder die Diagonalstörung der Ammerbeek

- (4) aus dem Vahlberger Abschnitt des verstürzten Deckgebirges über hydraulisch durchlässige Kontakte in die NE-Flanke der Asse-Struktur
- (5) im verstürzten Deckgebirge/Hutgestein weiter gegen SE

Der Geländeeinschnitt entlang der Störungen der Ammerbeek und von Groß Vahlberg, welcher SE des Schachtes Asse 2 den Asse Höhenzug quert, stellt ein lokales Exfiltrationsgebiet für Grundwasser dar. Unterhalb eines solchen Exfiltrationsgebietes ist der Grundwasserfluss aufwärts gerichtet und kann salzhaltiges Wasser hochschleppen. Nach Verdünnung, die die Lösungsdichte ausreichend senkt, um den Dichteeffekten entgegenzuwirken, können dadurch Anteile von Grubenlösung und Radionuklide zur Geländeoberfläche gelangen.

Transport-FEP	21.2.4	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Bereich des Geländeeinschnittes entlang der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg
Variant-FEP	21.5.0.3	Verdünnungsrate bis zu den Störungen Ammerbeek und Groß Vahlberg
Variant-FEP	21.5.0.4	Verdünnungsrate im Bereich des Geländeeinschnittes entlang der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg von der Basis des Kompartiments 21 bis zur Geländeoberfläche

Die Diagonalstörung von Groß Vahlberg reicht unmittelbar südöstlich des Schachtes Asse 2 bis ins verstürzte Deckgebirge hinein. Sie ist ebenfalls von einer quartären Rinne begleitet (FEP 29.3). Im Kontaktbereich zwischen Diagonalstörung und verstürztem Deckgebirge ist die Diagonalstörung zudem in Kontakt mit dem Rogenstein (su-p) der NE-Flanke. Je nach den hydraulischen Verhältnissen können Radionuklide, welche in das verstürzte Deckgebirge hochgepresst wurden, zu dessen Nordgrenze gelangen und entlang der Diagonalstörung in der Tiefe gegen Osten oder in den Rogenstein in der Tiefe gegen NW transportiert werden. Je nach dem Anteil der Grubenlösung in der Lösung wirken Dichteeffekte auch entlang dieser Pfade zusätzlich zu der bereits heute wirksamen Dichteschichtung (NaCl-Lösung – Süßwasser – Effekt).

Primär-FEP	26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
Variant-FEP	26.1.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
Transport-FEP	26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung
Primär-FEP	27.1	Grundwasserfluss im Rogenstein
Variant-FEP	27.1.0.1	Exfiltrations- und Infiltrationsverhältnisse im Bereich der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
Transport-FEP	27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung
Primär-FEP	28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg

Transport-FEP	28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung
---------------	--------	---

Der weitere Verlauf des Pfades hängt somit stark von den hydraulischen Verhältnissen ab, die am Ort des hydraulischen Kontakts von Diagonalstörung und Rogenstein herrschen (FEP 27.1.0.1). Entsprechend verschieben sich die möglichen Exfiltrationsorte.

Eine Vermischung mit unkontaminiertem Wasser erfolgt im verstürzten Deckgebirge (FEP 21.5.0.3), im Rogenstein oder in anderen gut leitenden Horizonten der NE-Flanke und schließlich im Quartär (FEP 29.2).

Primär-FEP	27.2	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Rogenstein
------------	------	---

Variant-FEP	27.2.0.1	Verdünnungsrate im Rogenstein
-------------	----------	-------------------------------

Die maßgebenden Transport-FEP für diese Pfade sind jene des Transports im Kompartiment 21 SE der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.2.2) und entweder jene des Transports im Rogenstein (FEP 26.1.1 und 27.1.1) oder des Transports in der Tiefe entlang der Diagonalstörung Groß Vahlberg ins Hangende des Rogenstein (FEP 28.1.1).

Sofern der Transport durch den Unteren Buntsandstein erfolgt, werden die Radionuklide dort durch Sorption zurückgehalten.

Variant-FEP	26.1.1.1	Sorption im Unteren Buntsandstein
-------------	----------	-----------------------------------

Der dritte der oben aufgelisteten Pfade aus dem verstürzten Deckgebirge ist jener in die Quer- oder die Diagonalstörung der Ammerbeek. Für diesen Pfad gelten weitgehend dieselben Aussagen wie für die in Kapitel 5.1.4.4 diskutierten Pfade mit relevanten Transportabschnitten in Störungen in der SW-Flanke des Asse Höhenzuges, außer dass der Übertritt nur in die Störungen der Ammerbeek erfolgen kann und dies in geringerer Tiefe als beim direkten Übertritt vom Rötanhydrit in eine Störung. Die Alternativen für die Fortsetzung des Pfads sind jedoch dieselben: (i) auf kurzem Weg in die Quartärrinnen der Störungen, (ii) in den Muschelkalk und entlang diesem zur Geländeoberfläche (Kapitel 5.1.4.6) oder (iii) entlang der Störungen ins Hangende des Muschelkalk und dort zur Oberfläche. Die entsprechenden Transport-FEP wurden in Kapitel 5.1.4.4 definiert (FEP 23.2.1, 24.1.1, 24.1.2, 25.1.1 und 29.3.1)

Analog zum hier diskutierten Abfließen von kontaminierter Lösung aus dem Kompartiment 21 in die Störungen der Ammerbeek wäre auch beim Weg „Rötanhydrit – Salzspiegel – Groß Denkte“ (Kapitel 5.1.4.2) ein Abfließen von Lösung aus dem verstürzten Deckgebirge in eine Querstörung der SW-Flanke, d.h. eine Abzweigung, denkbar. Solche Alternativwege hängen wesentlich vom hydraulischen Kontakt zwischen der in Kapitel 5.1.4.2 betrachteten Wegsamkeit und den Querstörungen ab. Da nordwestlich der Schachanlage Asse I die Subrosionsgerinne den Hauptbestandteil dieser Wegsamkeit bilden und diese eine höhere Leitfähigkeit aufweisen dürften als der Rötanhydrit in einer Störungszone, wird ein solcher Abfluss als unwahrscheinlich oder vernachlässigbar eingestuft. Die radiologischen Folgen eines Abflusses wären zudem geringer als der direkte Transportpfad nach Groß Denkte.

Primär-FEP	21.6	hydraulischer Kontakt zwischen Subrosionsgerinnen und Querstörungen an SW-Flanke
------------	------	--

Der vierte der oben genannten Pfade ausgehend vom verstürzten Deckgebirge SE der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) beruht auf dem sehr heterogenen Kontakt zwischen dem verstürzten Deckgebirge und der NE-Flanke des Asse Höhenzuges östlich der Diagonalstörung von Groß Vahlberg. In ständigem Wechsel und über den gesamten Teufenbereich des verstürzten Deckgebirges besteht dort Kontakt sowohl zum geringdurchlässigen Röt und den Tonen des Mittleren Muschelkalk wie auch zu den Aquiferen des Muschelkalk der NE-Flanke. Der Grundwasserspiegel liegt im verstürzten Deckgebirge höher als in der NE angrenzenden Zone. Da das verstürzte Deckgebirge hier vor allem aus tonigem Röt ausgebildet und zudem stark zerblockt ist [Colenco 2006a], ist der Lösungsabfluss und damit auch die Bedeutung des Pfades aus dem Vahlberger Abschnitt des verstürzten Deckgebirges über direkte Kontakte zum Muschelkalk in die NE-Flanke von beschränkter Bedeutung. Durch die Zerblockung des Deckgebirges auch in der NE-Flanke sind schichtparallele Transporte stark behindert und Dichteeinwirkungen von besonderer Bedeutung.

Primär-FEP	21.8	hydraulischer Kontakt zwischen dem verstürzten Deckgebirge und dem Muschelkalk der NE-Flanke im Vahlberger Abschnitt
Primär-FEP	28.2	Wegsamkeiten und Grundwasserfluss aus dem Vahlberger Abschnitt des verstürzten Deckgebirges über hydraulisch wirksame Kontakte direkt in den Muschelkalk der NE-Flanke
Variant-FEP	21.2.0.4	hydraulische Durchlässigkeit des verstürzten Deckgebirges im Vahlberger Abschnitt
Transport-FEP	28.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang FEP 28.2 mit Dichteeinwirkung
Primär-FEP	28.3	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Hangenden des Rogenstein
Variant-FEP	28.3.0.1	Verdünnungsrate im Hangenden des Rogenstein

Der fünfte der oben genannten Pfade ist jener über größere Distanzen im verstürzten Deckgebirge gegen SE. Die Obergrenze der Salzstruktur taucht südöstlich von Schacht Asse 2 tief ab und steigt östlich von Schacht Asse 3 bis zur Soltau wieder an. Da die hydraulische Leitfähigkeit des verstürzten Deckgebirges im Vahlberger Abschnitt relativ gering ist (FEP 21.2.0.4), wird Lösung mit Anteilen an Grubenlösung, welche in das verstürzte Deckgebirge hochgepresst wurde, eher gegen S in die Störungen der Ammerbeek oder gegen E gegen die Diagonalstörung von Groß Vahlberg, d.h. in einen der oben genannten Pfade abfließen. Aus diesen Gründen kann eine Ausbreitung im verstürzten Deckgebirge/Hutgestein über größere Distanzen gegen SE ausgeschlossen werden.

Transport-FEP	21.2.5	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in Kompartiment 21 Richtung SE südöstlich des Vahlberger Abschnitts
---------------	--------	---

5.1.4.6 Pfade mit Übertritt in die Muschelkalkaquifere

Ausbreitungspfade mit Übertritt in den Muschelkalk treten auf, falls vom Rötanhydrit ausreichend leitfähige Wegsamkeiten den Rötquitard (so₂ – so₄) queren (vgl. Kapitel 5.1.4.4). Diese Pfade dürften sogar dominant sein, falls die Auspressrate aus dem Grubengebäude und die dadurch erzeugte Druckerhöhung im Rötanhydrit einen Ab-

fluss der relativ schweren, $MgCl_2$ -haltigen Lösung erlauben, ohne dass ein Hochpresen zum Salzspiegel erfolgt (vgl. Kapitel 5.1.4.1).

Die Muschelkalkaquifere bilden ein mächtiges, für den lokalen, evtl. auch für den regionalen Grundwasserfluss bedeutendes Schichtpaket. An der SW-Flanke des Asse Höhenzuges streichen sie in Höhen aus, die deutlich über dem Talniveau der Remlinger Mulde liegen. Andererseits taucht der Muschelkalk in den regionalen Mulden südlich des Asse Höhenzuges in große Teufen und weist dort nur geringe Leitfähigkeiten auf. Dadurch wird der Grundwasserfluss in den Muschelkalkaquifere (FEP 24.1) am Südfuß des Asse Höhenzuges in erster Linie lokal bestimmt. Beim Übertritt von Radionukliden in den Muschelkalk sind drei weiterführende Pfade zu berücksichtigen:

- (1) Exfiltration im Bereich des Übertritts, speziell in Quartärrinnen (FEP 29.3) über Querstörungen, oder Fortsetzung des Pfades entlang der Querstörungen. Diese Pfade wurden in Kapitel 5.1.4.4 diskutiert.
- (2) schichtparalleler Transport mit Exfiltration im Nahbereich der Asse (lokales Fließsystem)
- (3) schichtparalleler Transport mit Exfiltration in größerer Entfernung von der Asse (regionales Fließsystem)

Je nach vorgängiger Vermischung der aus dem Grubengebäude ausgepressten $MgCl_2$ -reichen Lösung mit $NaCl$ -Lösung und der sich daraus ergebenden Dichte der kontaminierten Lösung (FEP 20.6.0.1) beim Zutritt in den Muschelkalk sowie dem dortigen Grundwasserfluss erfolgt der Radionuklidtransport in schichtparalleler Richtung mit mehr oder weniger stark abwärts gerichteter Tendenz gegenüber dem natürlichen Grundwasserfluss.

Die lokal dominierten Grundwasserflüsse im Muschelkalk (FEP 24.1) werden durch die wechselnde Höhe des Ausstreichens dieser Schicht entlang des Höhenzuges, der Höhe von möglichen lokalen Exfiltrationsgebieten sowie vom Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze im Muschelkalk (FEP 20.7.0.2) bestimmt. Die möglichen Exfiltrationsgebiete sind die quartären Rinnen über den Querstörungen, insbesondere jene der Störungen von Wittmar und Ammerbeek sowie die Störung von Groß Denkte, wo der Muschelkalk unter der Quartärüberdeckung gegen den gering durchlässigen unteren Jura versetzt ist und die Quellen M14 und M15 liegen. Ob Lösung aus dem Grubengebäude, die in den Muschelkalk übergetreten ist, vom lokalen Fließsystem erfasst (Weg (2)) oder unter diese in das langsame regionale Fließsystem abtaucht (Weg (3)) wird (im Rahmen der Modellgenauigkeit) mit numerischen Modellrechnungen untersucht [Colenco 2006b]. Aufgrund der Modellergebnisse und als ungünstigere Annahme ist von einer Ausbreitung mit dem lokalen Fließsystem, Weg (2), auszugehen.

Das regionale Fließsystem im Muschelkalk ist wegen des tiefen Abtauchens in den Mulden, den dort auftretenden geringen Leitfähigkeiten und wegen Dichteeffekten langsam [Colenco 2006a]. Aufgrund der regionalen Exfiltrationsgebiete des Muschelkalk im W und NW (Neindorf, Thiede) und der Infiltrationsgebiete im S und NE ist in der SW-Flanke des Asse Höhenzuges im Muschelkalk eine in der Tiefe gegen NW gerichtete regionale Fließkomponente zu erwarten.

Transport-FEP	24.1.2	schichtparalleler advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Muschelkalk mit Einfluss von Dichteeffekten
---------------	--------	--

Als mögliche Freisetzungsbereiche für den Weg (2) sind die quartären Rinnen der Querstörungen von Wittmar und Ammerbeek sowie das Gebiet um die Quellen M14 und M15 bei Groß Denkte zu betrachten. Nicht auszuschließen ist auch ein Transport von

Grubenlösungsanteilen mit dem lokalen Fließsystem im Muschelkalk gegen SE mit Exfiltration im Gebiet von Kl. Vahlberg.

Die möglichen Freisetzungsgebiete für den Weg (3) sind die Ausbisse des Muschelkalk bei den Salzstöcken Neindorf und Thiede.

Der Transportpfad kann jedoch auch – nach einer gewissen Strecke im Muschelkalk – entlang einer der Störungen nach SW weiterführen. Die Fortsetzung der Ausbreitung erfolgt dann gemäß den Ausführungen in Kapitel 5.1.4.4.

Der Muschelkalk ist ein Kluftgrundwasserleiter. Dies bedeutet, dass die Bewegung des Deckgebirgswassers im Muschelkalk entlang Wegsamkeiten mit geringem Fließquerschnitt, wie Klüften und Rissen, stattfindet. Die Kluftporosität ist sehr niedrig, die lokal auftretenden Abstandsgeschwindigkeiten in den Wegsamkeiten entsprechend hoch. Die fluidzugängliche Porosität des Muschelkalk ist im Vergleich zur Kluftporosität deutlich größer und wird im Wesentlichen durch das Porenvolumen der Gesteinsbereiche zwischen den Wegsamkeiten (Matrix) gebildet. In diesem Porenvolumen bewegt sich das Gebirgswasser praktisch nicht. Lösungsinhaltsstoffe gelangen durch Diffusion aus den durchströmten Wegsamkeiten in das Porenvolumen der Matrix. Erst wenn die Konzentration in den Wegsamkeiten wieder abgesunken ist, treten die Lösungsinhaltsstoffe wieder diffusiv aus der Matrix in die durchströmte Wegsamkeit über, um dann advektiv weitertransportiert zu werden. Der diffusive Austausch von Lösungsinhaltsstoffen zwischen den durchströmten Wegsamkeiten und den Gebirgsbereichen mit praktisch stagnierendem Gebirgswasser wird Matrixdiffusion genannt. Aufgrund der Matrixdiffusion ist die Transportgeschwindigkeit von Lösungsinhaltsstoffen – auch von nicht sorbierenden Spezies – erheblich langsamer als die lokale Abstandsgeschwindigkeit in den durchströmten Wegsamkeiten. Eine quantitative Abschätzung hat gezeigt, dass dieser Prozess mindestens für den schichtparallelen Transport über einige Distanz im Muschelkalk von Einfluss ist [Colenco 2006b]. Grundsätzlich wirkt der Prozess in jedem Kluftwasserleiter mit diffusiv zugänglicher Matrix.

Transport-FEP	24.1.3	Matrixdiffusion bei advektiv/dispersivem Transport im Muschelkalk
---------------	--------	---

Für die Transportpfade mit schichtparallelem Transport im Muschelkalk (Wege (2) und (3)) ergeben sich darüber hinaus und gegenüber der Diskussion in Kapitel 5.1.4.4 keine neuen FEP. Die mit dem Transport im Muschelkalk zusammenhängenden FEP gewinnen jedoch wesentlich an Bedeutung, ebenso wie der Dichteinfluss (FEP 20.7.1).

5.1.5 Übersicht über die Transportpfade für Grubenlösung im Deckgebirge

Der qualitative Identifikationsprozess der möglichen Transportpfade für die heutigen Verhältnisse am Standort ergibt eine große Zahl von denkbaren Wegen im Deckgebirge. Welche davon realistisch sind, hängt von der Auspressrate und den lokalen hydraulischen Verhältnissen in der SW-Flanke am Ort und zum Zeitpunkt des Übertritts von Radionukliden aus dem Wirtsgestein ab. Diese Sachverhalte bestimmen z.B., ob ein Hochpressen von kontaminierter Lösung ins verstrüzte Deckgebirge möglich ist oder nicht. Mit der zeitlichen Änderung der Auspressrate kann sich auch die relative Bedeutung der verschiedenen Pfade verschieben.

Eine zusammenfassende Übersicht über die identifizierten Pfade geben in der Art eines Ereignisbaum-Diagramms die Abbildungen 5-1a und 5-1b. In Abbildung 5-2 sind

die identifizierten Transportpfade in der Aufsicht in eine vereinfachte geologische Karte eingetragen. In diesen Abbildungen wird jedem Pfad eine Kennzahl zugewiesen.

Aufgrund der durchgeführten Modellrechnungen zur Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Grubenlösung im Deckgebirge der Asse [Colenco 2006b] lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Grubenlösung und – in geringerem Maße – auch verzögert in das Deckgebirge austretende Radionuklide werden bei allen realistisch zu unterstellenden hydraulischen Verhältnissen im Röttaquitard so₂-so₄ bis in das verstürzte Deckgebirge hochgepresst. Unterschiedlich sind die relativen Bedeutungen der Pfade 1ff und 10ff.
- Der größte Anteil der Grubenlösung breitet sich entlang der Transportpfade aus, die im Bereich des Tals der Ammerbeek in den Muschelkalk in der Südflanke führen (Pfade 10/13ff und 12/13ff).
- Kontaminierte Lösung, die in das verstürzte Deckgebirge hochgepresst wird, breitet sich vorwiegend entlang der Pfade 3, 4 und 5/13ff aus. Der Pfad 1 ist von untergeordneter Bedeutung.
- Eine Ausbreitung gegen SE über den Bereich Kl. Vahlberger Buchen hinaus (Pfade 7, 11 und 14) kann als äußerst unwahrscheinlich ausgeschlossen werden.

5.2 Langzeitentwicklung des Standortes

5.2.1 Übersicht

Die möglichen langzeitigen Entwicklungen am Standort Asse sind in [Colenco 2005a] ausführlich diskutiert. In diesem und den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse zusammenfassend wiedergegeben, die Folgerungen in Bezug auf die im Langzeitsicherheitsnachweis zu unterstellenden Szenarien gezogen und die entsprechenden FEP abgeleitet. Abbildung 5-3 zeigt schematisch den Zusammenhang von Einflussfaktoren (FEP), die im Rahmen dieser Szenarienentwicklung als unabhängig betrachtet werden können (linke Spalte), mit weiteren, für die Langzeitsicherheit relevanten FEP (mittlere und rechte Spalte).

Die Hauptergebnisse der geowissenschaftlichen Langzeitprognose lassen sich für einen Zeithorizont von 150'000 Jahren wie folgt zusammenfassen [Colenco 2005a]:

- (I) Stetig ablaufende Prozesse
 - sehr geringe regionale Hebungsrate von < 0,01 mm/a
 - regionale Erosion (Denudation) von rund 0,03 mm/a; kein Potential für eine Verstärkung
 - geringe salzkinetische Bewegung mit differentieller Hebung der Asse-Struktur von etwa 0,02 mm/a, im Bereich der Schachanlage Asse II ist auch ein Absinken möglich; keine erkennbaren Ursachen für eine künftige Verstärkung, Tendenz eher abnehmend

- Subrosion am Salzspiegel im Bereich der Subrosionsgerinne geologisch kurzfristig auf etwa 1 mm/a abfallend, anschließend langsame weitere Abnahme der Subrosion
- eventuelle Ausdehnung der Subrosionsgerinne, die heute W der Bohrung H17 nachgewiesen sind, gegen Schacht Asse 2
- subrosive Tieferlegung des Zechstein-Salzspiegels zwischen Schacht Asse 2 und Groß Denkte um rund 100 m auf -150 mNN innerhalb von 150'000 Jahren
- Nachsinken des Deckgebirges und Abbau der Höhendifferenz zwischen dem Infiltrationsgebiet Asse Höhenzug und den regionalen Vorflutern
- Subrosion der Salzstruktur an der Südflanke um mehrere Meter während der nächsten 150'000 Jahre
- ungefähr gleich bleibende hydraulische Leitfähigkeit des Rötanhydrit (so1A) entlang der Südflanke zwischen den Störungen Wittmar und Ammerbeek
- keine signifikanten Veränderungen der gebirgsmechanischen Verhältnisse im Deckgebirge über der Salzstruktur

(II) Wiederkehrende Ereignisse (Eiszeiten) und andere Klimaeinflüsse

- (IIa) Klimaentwicklung mit Eiszeit ohne Vergletscherung des Standortes (Typ „Weichsel-Vereisung“)
- zeitweilige Verzögerung der unter (I) genannten Prozesse während Eiszeiten ohne Eisüberföhrung mit folgenden Ausnahmen
 - erhöhte lokale Erosion
 - lokal stärker differenzierte Grundwasserneubildung
- (IIb) Klimaentwicklung mit Eiszeit mit Vergletscherung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“)
- eventuelle Reaktivierung der Subrosion und weitere Tieferlegung des Salzspiegels
 - potentiell kurzzeitige Erhöhung der Gebirgsspannung mit Reaktivierung der Verformungen im Wirtsgestein und der Konvergenz des Grubengebäudes, verbunden mit einem Wiederanstieg der Auspressung kontaminierter Lösung
 - Glazialisostatische Hebungen und Senkungen sind sowohl örtlich als auch zeitlich neutral.
 - Die gebirgsmechanischen Auswirkungen im Deckgebirge durch die rasche und asymmetrische Belastung während des Eisvorstoßes sind vergleichbar zu jenen der vergangenen Elster- und Saale-Eiszeiten.
 - Eine Tieferlegung der Quartärrinnen in den wesentlichen Quertälern (FEP 29.3) ist nicht zu erwarten.
 - Ausräumungen quartärer Talfüllungen sind nicht anhaltend und für die Grundwasserzirkulation im darunter liegenden Festgestein von geringem Einfluss.
- (IIc) Andere Klimaentwicklungen: feucht-warmes Klima, semiarides Klima, arides Klima, globale Klimaerwärmung (Meeresspiegelanstieg), keine Klimaänderung

- Bei den genannten anderen Klimaentwicklungen sind keine signifikant ungünstigeren Auswirkungen als bei (IIa) und (IIb) zu erwarten.
- (III) Schnelle externe Ereignisse
- Erdbeben: vernachlässigbare Auswirkungen
 - Meteoriteneinschlag und Vulkanismus: extrem geringe Eintrittswahrscheinlichkeit
- (IV) Einwirkungen durch das Grubengebäude
- rasch abnehmende gebirgsmechanische Einwirkungen des Grubengebäudes auf das Deckgebirge durch die geplanten Verschlussmaßnahmen (Verfüllen mit Salzgrus und Einbringen von Schutzfluid)

Die Klimaentwicklung IIa während der kommenden 150'000 Jahre, d.h. eine solche ohne Vergletscherung des Standortes (Typ „Weichsel-Vereisung“), wird als wahrscheinlicher eingestuft als eine Klimaentwicklung IIb mit Vergletscherung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“).

Für den Zeithorizont von 1 Mio. Jahren werden in [Colenco 2005a] folgende Aussagen gemacht:

- Eine Freilegung der Schachanlage an der Geländeoberfläche ist auszuschließen.
- Das Absinken des Salzspiegels bis zu den obersten Grubenbauen der Schachanlage Asse II ist zwar wenig wahrscheinlich, aber über einen Zeithorizont von mehreren 100'000 Jahren nicht mit ausreichender Sicherheit auszuschließen.

Abbildung 5-4 zeigt eine Übersicht der grob bewerteten Auswirkungen jener Einflussfaktoren, die in der vorliegenden Szenarienentwicklung als unabhängig betrachtet werden und in Abbildung 5-3 in der linken Spalte aufgeführt sind. Diese grobe Bewertung erlaubt naturgemäß keine Differenzierungen und soll lediglich helfen, die wesentlichen möglichen Langzeitentwicklungen im Auge zu behalten.

5.2.2 Referenzentwicklung des Standortes

Die wahrscheinlichste künftige Klimaentwicklung ist eine Fortsetzung der Abfolge von Warm- und Kaltzeiten. Als Grundlage für die Referenzentwicklung wird der in [Colenco 2005a] drehbuchhaft beschriebene Übergang zu eiszeitlichen Verhältnissen mit zwischengeschalteten Wärmeperioden innerhalb der nächsten 150'000 Jahren unterstellt, wobei ein Endstand des Inlandeises nördlich des Asse Höhenzuges angenommen wird (Typ „Weichsel-Vereisung“). Bei der Referenzentwicklung erfolgt somit innerhalb der nächsten 150'000 Jahre keine Überfahung des Standortes durch Eis, es tritt aber ausgedehnter Permafrost auf. Eine Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“) wird als alternative Klimaentwicklung in Kapitel 5.2.3 betrachtet.

Primär-FEP	20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Weichsel-Vereisung“)
------------	------	---

Primär-FEP	20.9	klimatische Entwicklung mit Vereisung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“)
------------	------	--

In der geowissenschaftlichen Langzeitprognose [Colenco 2005a] wurde dargelegt, dass die Auswirkungen von alternativen Klimaentwicklungen (feucht-warmes Klima, semiarides Klima, arides Klima, globale Klimaerwärmung mit Anstieg des Meeresspiegels, Fortdauer des heutigen Klimas) hinsichtlich Langzeitsicherheit nicht signifikant ungünstiger sind als bei den beiden genannten Klimaentwicklungen FEP 20.8 und FEP 20.9. Um die für die Szenarienentwicklung abdeckenden Eigenschaften der beiden Klimaentwicklungen zu verstärken, werden bei der Referenzentwicklung (FEP 20.8) alle dämpfenden und verzögernden Auswirkungen von Permafrost vernachlässigt. Andere Klimaentwicklungen müssen damit nicht betrachtet werden.

Primär-FEP	20.10	andere Klimaentwicklungen
------------	-------	---------------------------

Nach [Colenco 2005a] führt die klimatische Referenzentwicklung zu keinen nennenswerten Änderungen der bereits heute ablaufenden Prozesse. Die generell mit Eiszeiten zusammenhängenden FEP werden in Kapitel 5.2.3 diskutiert.

In Betracht zu ziehen beim Nachweis der Langzeitsicherheit sind die künftigen Veränderungen der Höhen- bzw. Teufenlagen der regionalen Vorfluter, der lokalen Infiltrationszonen auf dem Asse Höhenzug, des Salzspiegels und der obersten Grubenbaue durch regionale Hebung, regionale Erosion (Denudation), differentielle Hebung aufgrund salzkinetischer Prozesse, differentielle Erosion, Subrosion am Salzspiegel und dem Nachstürzen des Deckgebirges. Diese Prozesse wurden ausführlich in [Colenco 2005a] diskutiert. Nachfolgend werden die entsprechenden FEP aufgeführt und die Auswirkungen dargelegt.

Primär-FEP	20.15	regionale Hebung
Variant-FEP	20.15.0.1	Rate der regionalen Hebung
Primär-FEP	20.16	regionale Erosion (Denudation)
Variant-FEP	20.16.0.1	Rate der regionalen Erosion (Denudation)
Primär-FEP	15.5	Salzkinetik (inkl. Halokinese)
Variant-FEP	15.5.0.1	Rate der differentiellen Hebung/Senkung des Grubengebäudes unter heutigen Bedingungen
Primär-FEP	20.17	differentielle Erosion der Infiltrationszonen auf dem Asse Höhenzug
Variant-FEP	20.17.0.1	Rate der differentiellen Erosion
Primär-FEP	15.4	Subrosion des Wirtsgesteins
Variant-FEP	15.4.0.1	Subrosionsrate am Salzspiegel
Primär-FEP	21.7	fortschreitender Versturz des Deckgebirges über dem Salzspiegel
Variant-FEP	21.7.0.1	Versturzrate des Deckgebirges

Regionale Hebung und Erosion wirken gleichsam auf die lokalen Infiltrationszonen auf dem Asse Höhenzug wie auf die regionalen Vorfluter (Oker und Altenau). Für den Asse Höhenzug wird eine geringe differentielle Hebung durch salzkinetische Prozesse von etwa 0,02 mm/a angenommen [Colenco 2005a]. Es ist allerdings möglich, dass die Schachanlage Asse II in einem Bereich der Salzstruktur liegt, der infolge strukturparal-

lelem Abwandern von Salz absinkt. Als ungünstigere Annahme wird hier angenommen, dass auch die Schachanlage Asse II der genannten Hebungsrate unterliegt.

Für die Subrosionsrate am Salzspiegel wurde in [Colenco 2005a] ein geologisch kurzfristig relevanter Wert von etwa 1 mm/a ermittelt, der über einen Zeitraum von 150'000 Jahren deutlich absinken dürfte. Diese Subrosionsrate ist repräsentativ für den Bereich des Salzspiegels, der von Subrosionsgerinnen begleitet ist. Solche wurden westlich der Bohrung H17 nachgewiesen. Östlich der Ausdehnungsgrenze der Subrosionsgerinne – so im Bereich des Schachtes Asse 2 – liegt das relativ gering permeable Hutgestein direkt auf dem Salzgestein auf, so dass die Subrosionsrate dort deutlich niedriger ist. Es ist allerdings möglich, dass sich die Subrosionsgerinne mit fortschreitender Subrosion gegen SE, gegen den Schacht Asse 2 ausdehnen werden. Diese Ausdehnung könnte gebremst werden, wo nichtchloridische Schichten, z.B. die Anhydritmittel, am Salzspiegel ausstreichen oder wo der Salzspiegel gegen Osten abzutauchen beginnt. Für die Langzeitentwicklung des Standortes wird gleichwohl als Möglichkeit eine Ausdehnung der Subrosionsgerinne bis in den Bereich des Schachtes Asse 2 unterstellt.

Primär-FEP	21.3	Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE durch fortschreitende Subrosion
------------	------	---

Als Folge der Subrosion am Salzspiegel stürzt das Deckgebirge über der Salzstruktur langsam nach. Aufgrund der zahlreichen bestehenden Trennflächen im Deckgebirge kann von einer quasi-kontinuierlichen Bewegung ohne plötzliche, disruptive Ereignisse ausgegangen werden. Die gebirgsmechanischen Verhältnisse im verstützten Deckgebirge bleiben somit näherungsweise erhalten. Die Versturstrate ergibt sich als Differenz zwischen der Subrosionsrate und der differentiellen Hebungsrate.

Als Folge des fortschreitenden Versturzes des Deckgebirges über der Asse-Struktur und mit der anhaltenden, zu Beginn der Nachbetriebsphase jedoch rasch abklingenden Konvergenz des Grubengebäudes und der daraus resultierenden Bewegung der Südflanke der Salzstruktur gegen Norden wird sich die Auflockerungszone im Deckgebirge der Südflanke noch etwas ausdehnen. Die Bildung von neuen Störungszonen, die relevante neue Transportpfade schaffen oder die Grundwasserbewegung signifikant verändern würden, ist nicht wahrscheinlich. Mit zunehmender Kompaktion des Versatzes im Grubengebäude wird die Tragfähigkeit des Tragsystems Grubengebäude zunehmen (FEP 10.3.0.7, vgl. [Colenco 2006c]) und dadurch die stützende Wirkung der Salzstruktur an der Flanke der Schachanlage auf das Deckgebirge zu- und die Verformungen abnehmen. Der Gebirgsdruck in der Flanke der Schachanlage wird als Folge ansteigen, die Hauptspannungsdifferenzen sinken.

Variant-FEP	20.3.0.2	Zunahme der Gebirgsspannung und Abnahme der Hauptspannungsdifferenzen im Deckgebirge an der Flanke des Grubengebäudes durch ansteigende Stützwirkung des Versatzes in der Grube
-------------	----------	---

Variant-FEP	20.2.0.3	subrosionsbedingte Vergrößerung der Auflockerungszone
-------------	----------	---

Variant-FEP	20.4.0.2	Bildung von Störungen durch fortschreitenden Versturz des Deckgebirges
-------------	----------	--

Durch das Zusammenwirken der oben diskutierten Prozesse verändern sich die Höhen- und Teufenlagen ausgewählter Teile des Systems während der kommenden 150'000 Jahren. Gestützt auf die als repräsentativ geschätzten Raten ergeben sich die

in Tabelle 5-1 angegebenen Werte⁹. Sie illustrieren deutlich, dass die Subrosion und das Nachstürzen des Deckgebirges die dominanten Prozesse sind. Diese Prozesse bewirken einerseits eine deutliche Abnahme der Höhendifferenz zwischen den lokalen Infiltrations- und Exfiltrationszonen – was zu einer Abnahme des Grundwasserumsatzes führt – und andererseits ein Absinken des Salzspiegels gegenüber dem regionalen Vorfluter. Durch beide Prozesse nimmt die Subrosionsrate im Verlaufe der Zeit ab. Auch nach 150'000 Jahren besteht zwischen dem Salzspiegel und der Firste der obersten Grubenbaue noch eine ausreichend mächtige Steinsalz-Barriere von gut 100 m. Dem auch im Bereich der Tagesschächte Asse 2 und Asse 4 möglichen Absinken des Salzspiegels um rund 100 m (gegenüber der heutigen Teufe der Subrosionsgerinne) ist bei der Planung der Schachtverschlüsse Rechnung zu tragen.

Exemplar für BMBF und BMUB

⁹ Zur Nachvollziehbarkeit wurden die Werte nicht gerundet. Die Anzahl angegebener Ziffern ist kein Hinweis auf die Genauigkeit der Ergebnisse.

Prozess	Rate (repräsentativer Wert) [mm/a]	Auswirkungen in 150'000 Jahren [m]	Regionale Vorfluter [mNN]	Infiltrationszonen Asse Höhenzug [mNN]	Salzspiegel (Bereich Subrosionsgerinne) [mNN]	Firste Gruben- gebäude (490-m-Sohle) [mNN]
Heutige Höhe bzw. Tiefe	-	-	80	200	-60	-280
Regionale Hebung	0,01 mm/a	+1,5 m	81,5	201,5	-58,5	-278,5
Regionale Erosion	0,03 mm/a	-4,5 m	77	197	-	-
Differentielle Hebung	0,02 mm/a	+3 m	-	200	-55,5	-275,5
Differentielle Erosion	0,01 mm/a	-1,5 m	-	198,5	-	-
Subrosion	1 mm/a	-100 m (1)	-	-	-155,5	-
Nachstürzen Deckgebirge	0,98 mm/a (2)	-97 (2)	-	101,5	-	-
Höhen und Tiefen nach 150'000 Jahren	-	-	77	101,5	-155,5	-275,5

- (1) geschätzte Subrosion in 150'000 Jahren unter Berücksichtigung der abnehmenden Subrosionsrate (vgl. [Colenco 2005a])
(2) rechnerische Differenz zwischen Subrosionsrate und differentieller Hebungsrate

Tabelle 5-1: Veränderungen der Höhen- und Tiefenlagen ausgewählter Teile des Systems in den kommenden 150'000 Jahren (Angaben in mNN). Zur Nachvollziehbarkeit wurden die Werte nicht gerundet. Die Anzahl angegebener Ziffern ist kein Hinweis auf die Genauigkeit der Ergebnisse.

Langfristig wird sich durch die genannten Prozesse das Oberflächenrelief im Standortgebiet generell verflachen, wobei lokale Akzentuierungen möglich sind.

Primär-FEP	20.14	Oberflächenrelief
Variant-FEP	20.14.0.1	Veränderungen des Oberflächenreliefs
Variant-FEP	21.2.0.3	langzeitige Abnahme der Höhendifferenz zwischen der Infiltrationszone auf dem Assé Höhenzug und der Exfiltrationszone bei Groß Denkte
Variant-FEP	29.1.0.1	Veränderung von Grundwasserfluss und –umsatz durch Änderung des Oberflächenreliefs

Durch Subrosion an der Südflanke der Salzstruktur um mehrere Meter können im Verlauf der nächsten 150'000 Jahre zusätzliche hydraulische Wegsamkeiten zwischen Grubenbauen und dem Rötanhydrit entstehen, allerdings nur zu Grubenbauen der 574-m-Sohle und höher, eventuell auch zu solchen der 595-m-Sohle. Während die Auswirkungen von langfristig neu entstehenden Wegsamkeiten auf der 574-m-Sohle oder höher vergleichbar sind mit jenen der heute als bestehend unterstellten Wegsamkeiten (FEP 15.6), würde eine solche auf der 595-m-Sohle einem geringfügig anderen Zustand entsprechen. Der Einfluss auf den Austritt von Radionukliden in das Deckgebirge nach mehreren 10'000 Jahren wäre aber vernachlässigbar gering, da nach derart langen Zeiten die Radionuklidkonzentrationen auf der 574-m- und der 595-m-Sohle sehr ähnlich sind [ALSA-C 2005a].

Primär-FEP	15.21	Entstehung einer hydraulischen Wegsamkeit von der 595-m-Sohle zum Rötanhydrit (so1A) nach mehreren 10'000 Jahren durch Subrosion an der Südflanke
------------	-------	---

Während der kältesten Phasen wird die Mächtigkeit des kontinuierlichen Permafrostes in der Größenordnung von 100 m bis 200 m liegen. Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von Salz gegenüber nichtchloridischen Gesteinen könnte die Bildung von Permafrost über der Salzstruktur verzögert erfolgen oder sogar ganz ausbleiben. In Zonen mit Permafrost ist die Grundwasserneubildung verschwindend klein. Je nachdem, ob sich über der Salzstruktur Permafrost bildet oder nicht, verändern sich die Infiltrations- und Exfiltrationsverhältnisse, damit der Grundwasserumsatz in den oberflächennahen Grundwasserleitern (FEP 29.1) und der Grundwasserfluss in den tieferen Bereichen des Deckgebirges (FEP 20.7). Generell dürfte – in Verbindung mit der Abnahme des Oberflächenreliefs bis zum Eintreten der nächsten Eiszeit (FEPs 20.14.0.1, 21.2.0.3) – eher eine Abnahme der Grundwasserflüsse eintreten. In den Zeitabschnitten mit diskontinuierlichem Permafrost und in den Abschnitten mit borealem oder gemäßigttem Klima ist die Grundwasserneubildung geringer als heute bzw. erreicht Werte, die ungefähr den heutigen entsprechen dürften. Für die Referenzentwicklung des Standortes werden die dämpfenden, Prozesse verlangsamenden Einflüsse von Permafrost vernachlässigt.

Variant-FEP	20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrost
Variant-FEP	29.1.0.2	Veränderung von Grundwasserfluss und –umsatz durch Klimaänderung (ohne Vergletscherung)

Entsprechend des veränderten Oberflächenreliefs und der veränderten Infiltrations- und Exfiltrationsverhältnisse wird auch die Lage der Süß-/Salzwassergrenze Änderungen erfahren, insbesondere während der Perioden mit kontinuierlichem Permafrost. Die Süß-/Salzwassergrenze dürfte langfristig, und besonders während Perioden mit

Permafrost, eher ansteigen und die Versalzung der tieferen Teile der Aquifere eher zunehmen.

Variant-FEP	20.7.0.2	Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze im Deckgebirge/Hutgestein
-------------	----------	---

Die Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE durch fortschreitende Subrosion (FEP 21.3) wird zu einer Verlagerung der unterirdischen Grundwasserscheide im verstürzten Deckgebirge/Hutgestein nach SE führen. Im Extremfall wird so auch für den Bereich um den Schacht Asse 2 ein Abfluss des Salzwassers entlang einem Subrosionsgerinne in Richtung NW nach Groß Denkte möglich sein.

Variant-FEP	21.4.0.2	Verlagerung der unterirdischen Grundwasserscheide gegen SE gekoppelt an FEP 21.3
-------------	----------	--

Im Verlauf der Absenkung des Salzspiegels wird es sehr wahrscheinlich zu neuen und/oder erweiterten Kontakten zwischen dem verstürzten Deckgebirge und den seitlich im Kontakt dazu stehenden (oder zu stehen kommenden) durchlässigen Einheiten des Deckgebirges über den Strukturflanken kommen.

Bei kontinuierlichem, tief greifendem Permafrost können sich aufgrund der Temperaturänderungen im tiefen Untergrund und des unterschiedlichen thermischen Verhaltens der verschiedenen Gesteine Klüfte im Salzgestein bilden. Im Extremfall könnten solche Klüfte hydraulische Wegsamkeiten zwischen dem Grubengebäude und dem verstürzten Deckgebirge/Hutgestein darstellen, nach dem in [Colenco 2005a] entwickelten „Drehbuch“ für die künftige Klimaentwicklung allerdings erst nach rund 100'000 Jahren. Die Entstehung solcher Klüfte wird zwar als unwahrscheinlich eingestuft, soll hier aber nicht völlig ausgeschlossen werden. Wie in [Colenco 2006c] dargelegt wird, ist ein Austritt von radionuklidhaltiger Lösung entlang diesen neu entstehenden Wegsamkeiten in das verstürzte Deckgebirge oberhalb der Grube allerdings nur in Verbindung mit einer zeitnah anschließenden Vereisung des Standortes denkbar.

Primär-FEP	15.22	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Bildung von Klüften im Wirtsgestein im Zusammenhang mit Permafrost nach rund 100'000 Jahren
------------	-------	---

Transport-FEP	15.22.1	Radionuklidtransport entlang FEP 15.22 oder FEP 15.23 nach rund 100'000 Jahren oder mehr bei Vereisung des Standortes
---------------	---------	---

Auch über sehr lange Zeiten (Zeithorizont 1 Mio. Jahre) kann ein Freilegen des Grubengebäudes an der Geländeoberfläche ausgeschlossen werden. Das Absinken des Salzspiegels bis zu den obersten Grubenbauen nach mehreren 100'000 Jahren ist jedoch möglich. Die dadurch neu entstehenden Wegsamkeiten vom Grubengebäude ins verstürzte Deckgebirge/Hutgestein (Kompartiment 21) sind vom qualitativen Einfluss auf das System, wenn auch nicht hinsichtlich hydraulischer Leitfähigkeit, vergleichbar mit den durch FEP 15.22 beschriebenen Wegsamkeiten.

Primär-FEP	10.29	Freilegung des Grubengebäudes an der Geländeoberfläche
------------	-------	--

Primär-FEP	15.23	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Absinken des Salzspiegels nach mehreren 100'000 Jahren
------------	-------	--

Abgesehen von den oben angesprochenen Entwicklungen verändern sich die Transportpfade und –prozesse aufgrund der Langzeitentwicklung des Systems „Schachanlage Asse II und geologisches Umfeld“ gegenüber den Angaben in Kapitel 5.1 nicht qualitativ. Langzeitige Änderungen der maßgebenden Parameter sind jedoch zu erwarten. Solche wurden oben aufgeführt.

5.2.3 Alternative Klimaentwicklung (mit Vergletscherung des Standortes)

Als alternative Klimaentwicklung wird – bei gleichem „Drehbuch“ wie in der Referenzentwicklung – eine Vergletscherung des Standortes während der nächsten Eiszeit, d.h. nach frühestens 100'000 Jahren, unterstellt (Typ „Saale-Vereisung“, FEP 20.9).

Es wird angenommen, dass bei einer Eiszeit vom Typ „Saale-Vereisung“ der Inlandgletscher beim weitesten Vorstoß den Fuß des Harzes erreichen wird. Dabei würde der Eisrand 10 bis 30 km südlich der Asse liegen, und die Eishöhe bei der Asse dürfte wenige hundert Meter erreichen

Variant-FEP 20.9.0.1 Mächtigkeit des Gletschers

Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Vereisung des Standortgebietes innerhalb der nächsten 150'000 Jahre ist gering, und noch geringer ist die Wahrscheinlichkeit eines nachfolgenden Gletscherrückzugs (Eintreten von nacheiszeitlichen Verhältnissen) während dieser Zeitperiode. Von besonderer Bedeutung für die Langzeitsicherheit sind die relativ kurze Periode, während der der Gletscher über den Standort vorstößt, und wiederum die Nacheiszeit.

Im Zuge des Gletschervorstoßes kann es zur teilweisen Ausräumung von Talfüllungen kommen, ohne dass dabei der Felsuntergrund erreicht wird. Während des Gletscherrückzugs werden diese Ausräumungen vermutlich größtenteils durch fluviatile Sedimente wieder aufgefüllt werden. Der Einfluss dieser Prozesse auf den Grundwasserfluss im tieferen Untergrund ist vernachlässigbar.

Primär-FEP 20.18 glaziale Erosion und fluviatile Sedimentation nach Gletscherrückzug

Nach dem Vorstoß des Gletschers über den Standort sind die Grundwasserdrücke im Untergrund höher als vor der Vereisung. Die Entwässerung des Gletschers erfolgt sehr wahrscheinlich in eine subglaziale Rinne, die in der Okertalung zu erwarten ist. Lokal kann die Senke über dem verstürzten Deckgebirge als Entwässerungsrinne fungieren. Somit ist erhöhte Infiltration in diesem Bereich möglich.

Variant-FEP 20.5.0.6 erhöhter hydraulischer Druck während einer Vereisung des Standortes

Variant-FEP 20.7.0.3 Entwässerung des Gletschers über eine Senke über dem verstürzten Deckgebirge in eine subglaziale Rinne in der Okertalung bei Vergletscherung des Standortes

Im diesem Falle dürfte zwischen der Asse und der Oker ein Wasserabfluss gegen Westen mit einem hohen Gradienten (bis mehrere Zehnermeter pro Kilometer) erfolgen. An der Oberfläche des verstürzten Deckgebirges wird dabei eine Potentialdiffe-

renz vorliegen, die den heutigen Wert deutlich übersteigt, so dass von einer verstärkten Subrosion während der Eisüberlagerung auszugehen ist.

Variant-FEP	29.1.0.3	Erhöhter Grundwasserumsatz im oberflächennahen Grundwasserleiter bei Vergletscherung
Variant-FEP	21.2.0.5	erhöhter Grundwasserfluss im Kompartiment 21 bei Vergletscherung
Variant-FEP	15.4.0.3	erhöhte Subrosionsrate bei Eisüberlagerung

Da der erhöhte Grundwasserumsatz im oberflächennahen Grundwasserleiter (Kompartiment 29) zwar zeitlich mit der erhöhten Subrosion am Salzspiegel, nicht notwendigerweise jedoch mit den Folgen dieser erhöhten Subrosion zusammenfällt und da ein hoher Grundwasserumsatz im Kompartiment 29 für die Verdünnung günstig ist, wird dieser FEP 29.1.0.3 bei der alternativen Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes nicht unterstellt.

Andere Auswirkungen hat eine Entwässerung zum Gletscherrand hin. Bei einer Entwässerung gegen den im Süden liegenden Gletscherrand verlaufen die Potentiallinien ungefähr E-W, und die Gradienten sind geringer als bei einer Entwässerung in eine subglaziale Rinne in der Okertalung. Entlang des südost-nordwestlich verlaufenden Salzspiegels erzeugt eine solche Entwässerung keinen Wasserfluss, der zu einer nennenswert erhöhten Subrosion führt. Eine solche Entwässerung wird nicht unterstellt.

Variant-FEP	20.7.0.4	Entwässerung des Gletschers zum Gletscherrand
-------------	----------	---

Während der relativ kurzen Zeit, während der die Eisüberdeckung über den Standort vorrückt und sich im Eiskörper noch kein Porenwasser aufgebaut hat, kann die daraus resultierende Zunahme der effektiven Spannung im Deckgebirge und ihre Übertragung auf die Salzstruktur zur Verstärkung der Grubenkonvergenz und zu einer erhöhten Auspressung von Lösung in das umgebende Deckgebirge führen. Wie sich die dadurch, nach frühestens 100'000 Jahren erzeugte Auspressrate von jener in der mittleren Nachbetriebsphase quantitativ unterscheidet, hängt vom Fortschritt der Grubenkonvergenz bis zu jenem Zeitpunkt und der dann bestehenden Stützwirkung des Grubenversatzes ab. Sobald sich an der Gletscherbasis ein zusammenhängender Wasserkörper gebildet hat, welcher mit dem Grundwasser in hydraulischem Kontakt steht, steigt auch der Grundwasser- bzw. Lösungsdruck im Deckgebirge an, wodurch die effektive Gebirgsspannung wieder in den Bereich der Verhältnisse vor der Vereisung abfällt.

Variant-FEP	20.9.0.2	erhöhte Auspressrate von Lösung aus dem Grubengebäude während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
-------------	----------	--

Die gebirgsmechanischen Auswirkungen der Vergletscherung auf das Deckgebirge sind – abgesehen von der lokal veränderten Tragfähigkeit der Salzstruktur als Folge der Bergbautätigkeit – vergleichbar zu jenen während der vergangenen Elster- und Saale-Eiszeiten. Durch die Erhöhung der Auflast und/oder die nachfolgende Entlastung dürfte es zu einer weiteren Zerrüttung des Deckgebirges kommen. Da jedoch keiner der identifizierten Transportpfade auf intakten Teilen des Deckgebirges beruht, können diese Auswirkungen vernachlässigt werden.

Auch die Salzkinetik kann durch die Eisauflast verstärkt werden. Der Gesamtbeitrag der Salzkinetik zu den vertikalen Bewegungen am Standort Asse ist jedoch gering (vgl. Kapitel 5.2.2 und [Colenco 2005a]), so dass die Änderung bei einer Vergletscherung vernachlässigt werden kann.

Variant-FEP	20.3.0.3	Änderung des Spannungszustandes, glazial bedingt
Variant-FEP	10.6.0.8	Ansteigen der Konvergenzrate während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
Variant-FEP	15.3.0.2	Ansteigen der Gebirgsspannung im Wirtsgestein während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
Variant-FEP	15.5.0.2	Verstärkung der Salzkinetik durch Gletscherauflast
Variant-FEP	20.4.0.3	Bildung von Störungen durch Gletscherauflast

Die folgenden, mit einer Vergletscherung oder anderen Klimaänderungen zusammenhängenden FEP sind ohne Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit [Colenco 2005a] und brauchen deshalb nicht weiter diskutiert zu werden:

Primär-FEP	20.11	Meeresspiegelschwankung
Primär-FEP	20.12	Glazialisostasie

5.2.4 Klimaunabhängige externe Einwirkungen

Klimaunabhängige Prozesse können einen starken Einfluss auf die regionalen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen ausüben und somit auch die lokalen Bedingungen am Standort Asse und die dort ablaufenden Prozesse gravierend verändern. Es kann unterschieden werden zwischen langsamen/langanhaltenden endogenen Prozessen (Diagenese, Metamorphose, plattentektonisch induzierte Gebirgsbildung) und kurzfristigen/schnellen bzw. katastrophalen Ereignissen, die endogenen (Vulkanismus, Erdbeben) oder exogenen (Meteoriteneinschlag) Ursprungs sein können.

Das Einsetzen von langsamen, langanhaltenden endogenen Prozessen kann an keinem Ort der Erde mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Angesichts der geologischen Geschichte des Standortes Asse und seiner Umgebung ist die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten solcher Prozesse am Standort innerhalb der kommenden 1 Mio. Jahren jedoch äußerst gering und für den Nachweis der Langzeitsicherheit deshalb nicht zu unterstellen. Die folgenden FEP brauchen somit nicht berücksichtigt zu werden:

Primär-FEP	20.19	Epirogenetische Beckenbildung (Geosynklinalentwicklung) mit Transgression
Variant-FEP	20.1.0.1	Erhöhung der Sedimentüberdeckung
Variant-FEP	15.5.0.3	Verstärkung der Salzkinetik durch erhöhte Sedimentaflast
Primär-FEP	20.20	Epirogenetische Hebung (Geantiklinalentwicklung)
Variant-FEP	20.1.0.2	erosive Verringerung der Sedimentüberdeckung durch epirogenetische Hebung
Primär-FEP	20.21	Orogenese
Primär-FEP	20.22	Gesteinsmetamorphose

Lösungsmetamorphose ist speziell für Salzgesteine ein wichtiger Prozess. Er umfasst Umlösungsreaktionen beim Kontakt von Lösungen mit Salzgesteinen, mit denen diese nicht im chemischen Gleichgewicht stehen. Bei diesen Umlösungsreaktionen werden sowohl der Mineralbestand wie auch das Mineralgefüge verändert. Dadurch kommt es zur Veränderung der Gesteinseigenschaften. Lösungsmetamorphose findet an Oberflächen der Salzstruktur statt; dies wurde einerseits als FEP 15.4 bereits unter dem Stichwort „Subrosion“ diskutiert. Umlösungsreaktionen vom Grubengebäude aus sind andererseits in einer standortspezifischen Formulierung durch FEP 15.16 abgedeckt und durch das Einbringen von Schutzfluid ausgeschlossen. Bei mehreren hydraulischen Verbindungen zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge in verschiedenen Teufen kann aufgrund des Dichteefektes langfristig Schutzfluid in das Deckgebirge abfließen und Deckgebirgswässer in das Grubengebäude zutreten (vgl. [Colenco 2006c]). Diese zutretenden Wässer wären – mindestens an $MgCl_2$ – untersättigt und würden zu Umlöseprozessen führen, allerdings beschränkt auf Teufen oberhalb der tiefsten hydraulischen Verbindung zum Deckgebirge. Der Prozess und seine potentiellen Folgen werden ausführlich in [Colenco 2006c] diskutiert.

Weitere für den Nachweis der Langzeitsicherheit nicht zu unterstellende Prozesse sind:

Primär-FEP	20.13	Meteoriteneinschlag
Primär-FEP	20.23	magmatische Aktivität und Vulkanismus
Primär-FEP	20.24	seismische Aktivität
Primär-FEP	20.25	Magnetfeldänderungen

In [Colenco 2005a] wurde dargelegt, dass die Auswirkungen von seismischer Aktivität auf die Langzeitsicherheit unbedeutend sind. Magmatische Aktivität, Vulkanismus und Meteoriteneinschlag sind von äußerst geringer Wahrscheinlichkeit, so dass diese Prozesse und Ereignisse im Nachweis der Langzeitsicherheit nicht zu unterstellen sind. Umpolungen des Erdmagnetfeldes sind zwar geologisch belegt, können aber weder in ihrer Wahrscheinlichkeit bezüglich des nächsten Eintretens noch in ihren Auswirkungen hinreichend eingeschätzt werden.

6 Asse-spezifische FEP-Liste

6.1 Vollständigkeit und Klassierung der FEP

Im Kapitel 5 wurde die „Geosphäre“ des Systems Asse, d.h. das Teilsystem „Hutgestein und Deckgebirge“ und das Nahfeld-Kompartiment „Wirtsgestein“ beschrieben und die für die Langzeitsicherheit relevanten FEP identifiziert¹⁰. Gleichzeitig wurden die FEP dahingehend bewertet, ob sie bei allen möglichen künftigen Entwicklungen des Systems wirken, nur unter gewissen Umständen, oder ob ihre Wirkung bei allen Entwicklungen vernachlässigt werden kann. Die identifizierten FEP sind in Anhang A als Asse-spezifische FEP-Liste zusammengestellt. Die Liste enthält zudem die bei der Szenarienentwicklung Nahfeld identifizierten FEP [Colenco 2006c] und deckt damit das Gesamtsystem Asse ab. Die Bezeichnungen der FEP sind i.a. konkret und ausgesprochen Asse-spezifisch. Soweit möglich und zweckmäßig wurde bewusst auf generische, eine Vielzahl von potentiellen Einflussfaktoren einschließende Bezeichnungen verzichtet.

Die aus den Systembeschreibungen Nahfeld und Geosphäre abgeleitete FEP-Liste wurde mit internationalen FEP-Listen sowie FEP-Listen anderer Standorte verglichen und auf Vollständigkeit überprüft. Dabei ist zu beachten, dass die Bezeichnungen der FEP in verschiedenen Listen unterschiedlich formuliert sein können und bei standortunabhängigen Listen sowie bei Listen für generische Standorte breiter, weniger konkret gefasst sind. Die Vollständigkeitsprüfung wurde anhand folgender FEP-Listen durchgeführt:

- FEP-Liste der NEA (standortunabhängige FEP-Liste) [OECD 2000]
- FEP-Liste der WIPP (standortspezifische FEP-Liste für einen Standort in Salz mit flacher Lagerung) [USDOE 1996]
- PROSA-FEP-Liste (FEP-Liste für einen generischen Standort in einem Salzstock) [Prij 1993]
- FEP-Liste der SKB (FEP-Liste für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und abgebrannte Brennelemente im Kristallin) [SKB 1994]

Zur Asse-spezifischen FEP-Liste und speziell zur Vollständigkeitsüberprüfung sind folgende Bemerkungen anzubringen:

- Sehr spezielle FEP aus den zur Prüfung beigezogenen Listen, die in allgemeiner formulierten FEP subsummiert werden können und für das System Asse als unbedeutend eingestuft werden, werden nicht übernommen (z.B. Ettringitbildung bei Zementkorrosion).
- FEP, die eindeutig zukünftigen menschlichen Handlungen zuzuordnen sind, wurden nicht übernommen.

¹⁰

Die Beschreibung des Nahfeld-Kompartiments „Wirtsgestein“ beschränkt sich in diesem Bericht auf die Strukturen, die potentiellen Wegsamkeiten zwischen Grubengebäude und Deckgebirge und die Subrosion. Die weitergehende Beschreibung und Identifikation von FEP erfolgt in [Colenco 2006c].

- FEP, die sich explizit auf Detailprozesse in der Biosphäre und auf die Strahlenbelastung des Menschen beziehen, wurden aufgrund der in Kapitel 4.4 dargelegten Überlegungen ebenfalls nicht in die Asse-spezifische FEP-Liste aufgenommen.
- Radioaktiver Zerfall und Inventaraufbau von Folgeprodukten ist ein wesentlicher, in allen Szenarien wirksamer FEP (FEP 11.1.0.1). Sekundärprozesse des radioaktiven Zerfalls wie Zerfallswärme, radiologische Einflüsse auf Materialeigenschaften, Bildung radioaktiver Gase werden für den Systemteil „Geosphäre“ nicht in die Liste aufgenommen. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der Abfallzusammensetzung und durch die schon weit fortgeschrittene Verdünnung der Radionuklide bis zu ihrem Austritt aus dem Grubengebäude die Effekte des radioaktiven Zerfalls höchstens noch von sehr untergeordneter Bedeutung sind.
- Die Wirkung von Löslichkeitsgrenzen wird – außer in unmittelbarer Nähe der Übertrittsstelle durch die Steinsalz-Barriere – für die Geosphäre nicht unterstellt und entsprechende FEP auch nicht in die Liste aufgenommen. Es sind zwar Konstellationen denkbar, bei denen es durch wechselnde hydrochemische Verhältnisse oder durch Mischung von Lösungen auch zur Ausfällung radionuklidhaltiger Festphasen kommen kann, doch sind solche Fälle im Verlaufe einer zumeist stetig ansteigenden Verdünnung auf dem Weg durch das Deckgebirge, durch die sowohl die Radionuklidkonzentrationen als auch die Gesamtkonzentrationen abnehmen, wenig wahrscheinlich. Die Ausfällung von Radionukliden aus der Lösung wird daher für die Szenariientwicklung Geosphäre nicht berücksichtigt.
- Der Einfluss der chemischen Form der Radionuklide, von organischen und anorganischen Komplexbildnern und von Kolloiden auf die Sorption und die Löslichkeit wird als Bestandteil der FEP „Sorption“ und „Ausfällung“ betrachtet und nicht als gesonderte FEP aufgenommen. In diesem Zusammenhang sollen auch die in den internationalen FEP-Listen erwähnten Biofilme angesprochen werden. Die Existenz und die Wirksamkeit solcher Biofilme sind für die einzelnen Kompartimente der Geosphäre nur schwer belegbar. Ihr Einfluss wird jedoch als gering erachtet und daher in der Szenarienantalyse vernachlässigt.
- Die FEP, welche den Aufstieg von Gas aus der Grube durch das Deckgebirge zur Geländeoberfläche beschreiben, sind in der Asse-spezifischen FEP-Liste in Anlage A und damit auch in den anderen Anlagen bewusst nicht explizit aufgeführt. Sie differenzieren nicht zwischen Szenariengruppen und sind deshalb für die Szenariientwicklung nicht erforderlich. Sie ergeben sich durch Übertragung aus den entsprechenden FEP des Nahfeldes auf das Deckgebirge (FEP 10.17, 10.17.1, 10.18, 10.19, 10.20, 14.11, 14.11.1, 14.11.2, 14.11.3 und zugehörige Variant-FEP).

Entsprechend ihrer Bedeutung für die Langzeitsicherheit und für die Differenzierung der Szenariengruppen lassen sich die FEP wie folgt klassieren:

- A in allen Szenarien zu berücksichtigende FEP
- B FEP, die nur in einem Teil der Szenarien unterstellt werden und damit zwischen Szenariengruppen differenzieren
 - B_N Teilmenge von Klasse B: FEP, welche Szenariengruppen nur bezüglich der Entwicklung im Teilsystem Nahfeld (ohne Wirtsgestein) unterscheiden, auf die Entwicklung im Teilsystem Hutgestein/Deckgebirge und im Wirtsgestein jedoch keinen Einfluss haben
 - B_G Teilmenge von Klasse B: FEP, welche Szenariengruppen nur bezüglich der Entwicklung im Teilsystem Hutgestein/Deckgebirge unterscheiden, auf die

Entwicklung im Nahfeld (einschließlich Wirtsgestein) jedoch keinen Einfluss haben

- C FEP, die nie zu unterstellen sind, sei es, weil ihr Eintreten ausreichend unwahrscheinlich oder weil die Auswirkung auf die Langzeitsicherheit vernachlässigbar gering ist

Diese Klassierung ist im Hinblick auf die Anwendung der PROSA-Methodik sinnvoll. Nach der PROSA-Methodik unterscheiden sich Szenariengruppen dadurch, ob gewisse Primär- oder Transport-FEP als wirksam unterstellt werden oder nicht (vgl. Kapitel 3). Die Anwendung der Methodik ist umso übersichtlicher, je weniger FEP szenariendifferenzierend wirken und damit bei der Entwicklung der Szenariengruppen explizit anzusprechen sind. FEP, die wie z.B. der radioaktive Zerfall in jedem Fall wirken, d.h. die FEP der Kategorie A, brauchen bei der Szenarientwicklung nicht explizit aufgeführt zu werden. Sie sind erst bei der Beschreibung der entwickelten Szenariengruppen wieder einzufügen und – selbstverständlich – bei der Konsequenzanalyse zu berücksichtigen. Sinngemäß kann mit den FEP der Klasse C verfahren werden. FEP, die nach der Bewertung in der Systembeschreibung nie zu unterstellen sind, brauchen bei der Anwendung der PROSA-Methodik nicht explizit angesprochen und bei der Konsequenzanalyse auch nicht berücksichtigt zu werden.

Variant-FEP werden i.A. nicht in Klassen A, B und C gruppiert, ihre Wirkung ist an jene des zugehörigen Primär- bzw. Transport-FEP gekoppelt. Da die Zuweisung einzelner FEP zu den Kategorien Primär-, Transport- und Variant-FEP nicht in jedem Fall streng definitionsgemäß erfolgen kann und da das Ergebnis nicht von dieser Zuweisung abhängen darf, wurden bei Bedarf auch Variant-FEP der entsprechenden Klasse zugewiesen.

Mit der Zusatzklassierung einzelner FEP der Klasse B in die Unterklassen B_N und B_G kann sich die Szenarientwicklung nach PROSA auf folgende FEP konzentrieren:

- Szenarientwicklung Nahfeld: FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G
- Szenarientwicklung Geosphäre: FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N

Die Klassifizierung der FEP in die Klassen A, B (mit Unterklassen B_N und B_G) und C stützt sich auf die Bewertungen in den beiden Systembeschreibungen, für die Geosphäre in Kapitel 5 dieses Berichtes und für das Nahfeld in [Colenco 2006c]. Sie ist ebenfalls in Anhang A aufgeführt.

6.2

Schnittstelle zwischen Nahfeld und Geosphäre

Die Schnittstelle zwischen dem Teilsystem Nahfeld und dem Teilsystem Hutgestein/Deckgebirge bildet die Grenze zwischen dem Wirtsgestein (Zechsteinsalinar und Rötsteinsalz so1Na) und dem Hutgestein/Deckgebirge. Die Wechselwirkungen zwischen den beiden Teilsystemen sind

- Wirkung von Deckgebirge / Hutgestein auf die Salzstruktur und das Grubengebäude:
 - gebirgsmechanische Einwirkung
 - Subrosion

- Zuführen von Deckgebirgswasser in das Wirtsgestein und das Grubengebäude und chemische Zusammensetzung der zutretenden Wasser bzw.
- hydraulische und hydrochemische Randbedingung an den Orten der wirksamen Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere
- Wirkung von der Salzstruktur und vom Grubengebäude auf das Deckgebirge / Hutgestein:
 - gebirgsmechanische Stützwirkung der Salzstruktur
 - Austritt von Lösung („R-Lösung“) in das Deckgebirge/Hutgestein, dadurch Änderungen des hydraulischen Drucks und des geochemischen Milieus
 - Austritt von Druckluft (in der Betriebsphase) und Gas (in der Nachbetriebsphase) in das Deckgebirge/Hutgestein, dadurch Änderungen des Fluiddrucks und der Sättigungsverhältnisse
 - Austritt von Radionukliden in das Deckgebirge/Hutgestein

Die FEP, welche einen Fluidübertritt von einem Teilsystem in das andere beschreiben, sind der Kategorie 10 „Übergeordnete FEP Nahfeld“ zugewiesen. Erdwissenschaftliche Prozesse und Ereignisse wie die Klimaentwicklung, welche auf das Gesamtsystem wirken, gehören der Kategorie 20 „Übergeordnete FEP Hutgestein und Deckgebirge“ an.

Für die Szenariientwicklung Geosphäre sind jene Wirkungen an der Schnittstelle zum Nahfeld wesentlich, welche von diesem auf das Deckgebirge gerichtet sind. Diese gehören – soweit sie szenarienbestimmend sind – der Klasse B, nicht aber der Unterklasse B_N an, sie werden nachfolgend aufgeführt.

Die Änderungen der Stützwirkung der Salzstruktur auf das Deckgebirge, das Austreten von Druckluft in das Deckgebirge während der Betriebsphase, das Auspressen von Lösung in das Deckgebirge in der Nachbetriebsphase, die damit zusammenhängenden Änderungen des Lösungsdrucks und der hydrochemischen Verhältnisse im Deckgebirge, der Übertritt von Radionukliden mit kontaminierter Lösung, das Austreten von Gas aus dem Nahfeld in das Deckgebirge und der zugehörige Übertritt von volatilen Radionukliden in der Gasphase sind nicht in einfacher Weise einer Systemkomponente zuzuweisen. In der Szenariientwicklung Nahfeld werden die Lösungsauspressung und Radionuklidübertritte den Kompartimenten 14 (Übriges Grubengebäude) und 15 (Wirtsgestein) zugewiesen. Da für das Teilsystem Deckgebirge/Hutgestein die Übertritte aus dem Nahfeld erfolgt und eine Differenzierung nach Kompartimenten für das Deckgebirge ohne Bedeutung ist, werden zusätzlich entsprechende FEP für das undifferenzierte Teilsystem 10 („Nahfeld Übergeordnete FEP“) definiert (z.B. FEP 10.3, 10.4, 10.14, 10.33). Die möglichen Orte des Übertritts aus dem Wirtsgestein in das Deckgebirge/Hutgestein beschreiben die FEP des Kompartiments 15 (Wirtsgestein).

Nachfolgend sind die FEP aufgeführt, welche Wirkungen des Nahfeldes auf das Teilsystem Hutgestein/Deckgebirge beschreiben und szenarienbestimmend sein können, d.h. FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N). Einige dieser FEP sind nur in [Colenco 2006c] definiert und bewertet, nicht aber im vorliegenden Bericht.

Variant-FEP	15.2.0.2	Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase
-------------	----------	--

Variant-FEP	15.3.0.2	Ansteigen der Gebirgsspannung im Wirtsgestein während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
Variant-FEP	15.4.0.3	erhöhte Subrosionsrate bei Eisüberlagerung
Variant-FEP	15.7.0.1	Reaktivierung des Lösungsaustritts entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23
Variant-FEP	15.7.1.1	Reaktivierung des Radionuklidtransports entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23
Primär-FEP	15.10	erheblicher Gasaustritt aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte
Transport-FEP	15.10.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte als Folge von FEP 15.10
Primär-FEP	15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
Transport-FEP	15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
Primär-FEP	15.22	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Bildung von Klüften im Wirtsgestein im Zusammenhang mit Permafrost nach rund 100'000 Jahren
Transport-FEP	15.22.1	Radionuklidtransport entlang FEP 15.22 oder FEP 15.23 nach 100'000 Jahren oder mehr bei Vereisung des Standortes
Primär-FEP	15.23	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Absinken des Salzspiegels nach mehreren 100'000 Jahren

Durch die Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase kann sich der Ort des Übertritts von Lösung, Gas und Radionukliden in das Deckgebirge in der Südflanke geringfügig nach oben verschieben (vgl. [Colenco 2006c]). Eine solche Verschiebung hätte keine qualitativen Auswirkungen auf die Ausbreitung im Deckgebirge und kann für die Szenarienentwicklung Geosphäre vernachlässigt werden.

Das Ansteigen der Gebirgsspannung im Wirtsgestein während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort bei einer Vergletscherung führt nicht zu qualitativ neuen Wegsamkeiten vom Grubengebäude durch die Steinsalz-Barriere ins Deckgebirge (vgl. [Colenco 2006c]) und kann deshalb ebenfalls für die Szenarienentwicklung Geosphäre vernachlässigt werden.

Eine Reaktivierung des Lösungs- und Radionuklidaustritts nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder 15.23 (vgl. Kapitel 5.2.2) ist bei der Szenarienentwicklung zu berücksichtigen. Dasselbe gilt für den Gasaustritt aus dem Grubenge-

bäude in das Deckgebirge, der entweder zum größten Teil durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke (FEP 15.11) oder entlang der verschlossenen Tagesschächte (FEP 15.10) erfolgen kann (vgl. [Colenco 2006c]).

Exemplar für BMBF und BMU

7 Szenarien-Entwicklung

7.1 Konzeptuelles Vorgehen

Die Szenarientwicklung, d.h. die Identifizierung der in der Langzeitsicherheitsanalyse zu betrachtenden möglichen Entwicklungen des Gesamtsystems, erfolgt nach der in Kapitel 3 kurz und in [Prij 1993] und [Grupa 1999] ausführlicher beschriebenen PRO-SA-Methodik. Danach wird jede Szenariengruppe durch Festlegung der berücksichtigten und der nicht berücksichtigten FEP, d.h. der unterstellten und der nicht unterstellten Systemeigenschaften, Ereignisse und Prozesse charakterisiert. Dies erfolgt getrennt für

- das Teilsystem Nahfeld und für
- den Teil Geosphäre, d.h. das Teilsystem Hutgestein/Deckgebirge und das Wirtsgestein

unter Verwendung der gleichen FEP-Liste für das Gesamtsystem Asse. Dies ist möglich durch die in Kapitel 6.1 definierte weitere Klassierung eines Teils der FEP der Klasse B, d.h. der szenarien-bestimmenden FEP, in jene, die nur im Nahfeld (ohne Wirtsgestein) wirken (Unterklasse B_N), und jene, die nur im Hutgestein und Deckgebirge wirken (Unterklasse B_G). Die verbleibenden FEP der Klasse B wirken in beiden Teilsystemen und bestimmen dadurch auch die möglichen und nicht möglichen Kombinationen von Nahfeld-Szenarien und Geosphären-Szenarien. Zu den letztgenannten FEP der Klasse B, d.h. jene, welche weder der Unterklasse B_G noch B_N angehören, zählen z.B. die FEP für die Klimaentwicklung und für den Gasfluss entlang der Tagesschächte. Dies wird in Kapitel 7.2 im Anschluss an die kurze Charakterisierung der Nahfeld-Szenariengruppen konkretisiert.

Die Szenarientwicklung Nahfeld beruht auf der Kombination der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G . Sie ist in Anhang B.1 tabellarisch dargestellt und in [Colenco 2006c] ausführlich diskutiert. Die Szenarientwicklung Geosphäre beruht demgegenüber auf der Kombination der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N . Sie ist in Anhang B.2 tabellarisch ausgeführt und wird nachfolgend in Kapitel 7.3 diskutiert. In den Anhängen B.1 und B.2 sind die FEP der Klasse B, welche weder der Unterklasse B_G noch B_N angehören, grau hinterlegt. Diese FEP sind sowohl bei der Szenarientwicklung Nahfeld als auch bei der Szenarientwicklung Geosphäre einzubeziehen.

Der Betrachtungszeitraum der Szenarientwicklung entspricht jenem der geowissenschaftlichen Langzeitprognose [Colenco 2005a] und beträgt im engeren Sinne 150'000 Jahre, im weiteren Sinne einige 100'000 Jahre. Für den kürzeren Zeitraum sollen alle möglichen Entwicklungen abdeckend erfasst werden, für den längeren Zeitraum nur ausgewählte FEP von besonderer potentieller Bedeutung für die Langzeitsicherheit. Die Grenze von 150'000 Jahren ist in Bezug auf die Abnahme der Radiotoxizität des Abfallinventars in den Einlagerungsbereichen angemessen (vgl. die Abbildung 5-1a und 5-1b in [Colenco 2006c]).

7.2 Szenarien für das Nahfeld

Die Identifikation der Szenarien für das Nahfeld für den Standort Asse ist Gegenstand von [Colenco 2006c]. Insgesamt werden dort sechs Nahfeld-Szenariengruppen definiert. Eine kurze Charakterisierung vermittelt dieses Kapitel.

Die Entwicklung des Teilsystems Nahfeld und die daraus resultierende Mobilisierung und Ausbreitung von Radionukliden hängt von zahlreichen, teilweise wechselwirkenden Sachverhalten, Ereignissen und Prozessen (FEP) ab. Zu nennen sind insbesondere die geomechanische Entwicklung und die Konvergenz des Grubengebäudes, die Wirksamkeit der Strömungsbarrieren, die Gasbildung, die Entwicklung des geochemischen Milieus in den Einlagerungsbereichen, die resultierende Rückhaltung von Radionukliden durch Löslichkeit und Sorption, die Lösungsbewegung durch Konvergenz und Gasspeicherung, Änderungen der Lösungsdichte durch Wechselwirkung mit Zement, Lösungsbewegung durch Unterschiede der Lösungsdichte (Konvektion), Radionuklidtransport in gelöster Phase durch Advektion/Dispersion und Diffusion, Radionuklidtransport in der Gasphase und letztendlich das Auspressen von kontaminierter Lösung und das Austreten von radionuklidhaltigem Gas über wirksame Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge.

Selbst bei einheitlicher qualitativer Entwicklung des Teilsystems Nahfeld, d.h. in Szenarien derselben Szenariengruppe, kann die Entwicklung und damit auch das Austreten von Radionukliden aus der Grube in das Deckgebirge aufgrund der großen Zahl an maßgebenden Parametern quantitativ sehr unterschiedlich sein. Die Szenariengruppen decken deshalb jede für sich ein breites Spektrum der möglichen Entwicklungen ab. Dies gilt insbesondere die Szenariengruppe des Referenzszenarios.

Die in [Colenco 2006c] identifizierten Szenariengruppen für das Nahfeld sind:

Szenariengruppe des Referenzszenarios (in Bezug auf das Nahfeld)	<ul style="list-style-type: none"> - wirksame Rückhaltung ausgewählter Radionuklide in den Einlagerungsbereichen durch Löslichkeit und Sorption - vernachlässigbares Eindringen von Lösung in den Fasskegel in der MAW-Kammer (verhindert durch eingeschlossene Luft), dadurch - vernachlässigbar geringe Mobilisierung von Schadstoffen aus den MAW sowie - geringe Gasbildung im Fasskegel in der MAW-Kammer - Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke zwischen 574 m und 500 m Teufe - Auspressen von Lösung und Austreten von Gas aus der Grube in den Rötanhydrit so1A der Südflanke zwischen 574 m und 500 m Teufe - kein oder höchstens ein sehr geringer Gasaustritt entlang der Tagesschächte - Klimaentwicklung ohne Vereisung des Standortes innerhalb der kommenden 150'000 Jahre
---	--

Nahfeld-Szenariengruppe acM	<ul style="list-style-type: none"> - keine nennenswerte Rückhaltung von Radionukliden und anderen Schadstoffen in einem oder mehreren Einlagerungsbereichen durch Löslichkeit und Sorption - im Übrigen gleich wie Szenariengruppe des Referenzszenarios in Bezug auf das Nahfeld
Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW	<ul style="list-style-type: none"> - rasches Entweichen der Grubenluft aus den Kammern 8a/532 und 8b/532 während des Einleitens von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke und während der frühen Nachbetriebsphase, begleitet von einem raschen Eindringen von Schutzfluid in die beiden Kammern, anschließend - Eindringen von Lösung in den Fasskegel in der MAW-Kammer bis in eine nennenswerte Höhe während der Periode des Anstiegs des Fluiddrucks in der Grube - Mobilisierung von Radionukliden aus den MAW mit Wirkung von Löslichkeitsgrenzen und Sorption - stärkere Gasbildung im Fasskegel in der MAW-Kammer als in der Nahfeld-Szenariengruppe des Referenzszenarios - im Übrigen gleich wie Szenariengruppe des Referenzszenarios in Bezug auf das Nahfeld, insbesondere für die LAW
Szenariengruppe vZdSB (in Bezug auf das Nahfeld)	<ul style="list-style-type: none"> - Anwachsen der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke bis in den Firstbereich der 490-m-Sohle (574 m bis 474 m Teufe) bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase - Existenz von hydraulischen Wegsamkeiten in 474 m Teufe von der Grube durch die Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke - Austreten von Gas aus dem Grubenhöchsten in das Deckgebirge der Südflanke ohne vorgängige Bildung eines relativ mächtigen Gaspolsters im Grubenhöchsten - im Übrigen gleich wie Szenariengruppe des Referenzszenarios in Bezug auf das Nahfeld

Szenariengruppe GTs (in Bezug auf das Nahfeld)	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhte Permeabilität entlang der sorelbetonverfüllten Auffahrungen auf der 490-m-Sohle und entlang einem (oder beiden) verschlossenen Tagesschächte sowie verminderter Gaseindringdruck der betroffenen Schachtverschlüsse (einschließlich Auflockerungszone) - erheblicher Gasaustritt entlang einem oder beiden Tagesschächten - kein Gasaustritt durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke - im Übrigen gleich wie Szenariengruppe des Referenzszenarios in Bezug auf das Nahfeld
Szenariengruppe Vg (in Bezug auf das Nahfeld)	<ul style="list-style-type: none"> - Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes innerhalb der kommenden 150'000 Jahre, jedoch frühestens nach rund 100'000 Jahren - bis zur Vergletscherung gleiche Entwicklung wie in Nahfeld-Szenariengruppe des Referenzszenarios - deutlich erhöhte Auflast während der Vergletscherung - höherer Fluiddruck im Grubengebäude aufgrund des höheren hydraulischen Drucks im Deckgebirge, verzögerter Anstieg nach Vordringen des Eisrandes über den Standort - Eindringen von Lösung in den Fasskegel in der MAW-Kammer bis in eine nennenswerte Höhe während des Anstiegs des Fluiddrucks im Grubengebäude - Mobilisierung von Radionukliden aus den MAW nach Lösungszutritt mit Wirkung von Löslichkeitsgrenzen und Sorption - keine nennenswerte Gasbildung nach Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel - erhöhte effektive Gebirgsspannung während des Vordringens des Eisrandes über den Standort - „kurzzeitig“ erhöhte Konvergenzrate und Auspressen von kontaminierter Lösung (gegenüber dem Wert vor der Vergletscherung) - Entstehung neuer Wegsamkeiten von der Grube in das verstückte Deckgebirge ab rund 100'000 Jahren

Die Übersicht über die in den einzelnen Szenariengruppen in Bezug auf das Nahfeld als wirksam und als nicht wirksam unterstellten FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_G) gibt Anhang B.1. Die vollständige Liste aller wirksamen FEP in Bezug auf das Nahfeld der Klassen A und B (ohne Unterklasse B_G), einschließlich der zugehörigen Variant-FEP, ergibt sich aus der Kombination von Anhang C.1 (alle FEP der Klasse A) und dem Anhang C.2 bis C.7 der entsprechenden Szenariengruppe.

Anhang B.1 zeigt, dass die Szenariengruppen des Referenzszenarios, des Szenarios acM und des Szenarios LsgMAW durch identisch wirksame FEP der Kategorie B (ohne Unterklasse B_N) charakterisiert sind. Jede Geosphären-Szenariengruppe, die in Bezug auf das Nahfeld auf der Szenariengruppe des Referenzszenarios aufbaut, kann damit auch mit einer der Nahfeld-Szenariengruppen acM und LsgMAW kombiniert werden. Die Szenariengruppe vZdSB unterscheidet sich von jener des Referenzszenarios nur in der Wirksamkeit von FEP 15.2.0.2 (Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase). Dieser FEP hat auf die Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung im Deckgebirge keinen signifikanten Einfluss, wohl aber auf den Austritt von Gas aus dem Grubengebäude und damit möglicherweise auf die Ausbreitung von radioaktiven Gasspezies. In Bezug auf die Ausbreitung von Radionukliden in Lösung kann deshalb auch die Szenariengruppe vZdSB mit jeder Geosphären-Szenariengruppe kombiniert werden, die mit der Szenariengruppe des Referenzszenarios kompatibel ist. Das gleiche gilt für die Szenariengruppe GTs.

Die möglichen und ausgeschlossenen Kombinationen von Nahfeld- und Geosphären-Szenariengruppen in Bezug auf die Ausbreitung von Radionukliden im Deckgebirge werden in Kapitel 7.4 diskutiert, nach der Entwicklung der Geosphären-Szenariengruppen in Kapitel 7.3.

7.3 Szenarien für die Geosphäre

Die Szenariengruppen für die Geosphäre werden gestützt auf die Ausführungen in Kapitel 7.2 auf der Basis der Szenariengruppe des Referenzszenarios sowie der Szenariengruppen vZdSB (hinsichtlich der Ausbreitung von Gas), GTs (hinsichtlich der Ausbreitung von Gas) und Vg entwickelt. Die Szenariengruppen für die Geosphäre hinsichtlich der unterschiedlichen Bedeutungen der Ausbreitungspfade im Deckgebirge werden dabei ausgehend von der Nahfeld-Entwicklung in der Szenariengruppe des Referenzszenarios dargestellt.

Die szenarien-bestimmenden FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) und deren Wirksamkeit in den einzelnen Szenariengruppen sind in Anhang B.2 zusammengestellt.

7.3.1 Szenariengruppe des Referenzszenarios

Die Szenariengruppe des Referenzszenarios ist charakterisiert durch

- eine Entwicklung im Grubengebäude gemäß Nahfeld-Szenariengruppe des Nahfeld-Referenzszenarios
- eine Klimaentwicklung gemäß der klimatischen Referenzentwicklung, d.h. ohne Vereisung des Standortes innerhalb der kommenden 150'000 Jahre (Typ „Weichsel-Vereisung“)
- das Auspressen von Lösung und das Austreten von Gas aus der Grube in den Rötanhidrit der Südflanke der Salzstruktur zwischen 500 m und 574 m Teufe

- den vorherrschenden Transport der aus dem Grubengebäude ausgetretenen Radionuklide in Lösung durch den Rötquitard (so2-so4) in den Muschelkalk, hauptsächlich durch den Scherdeformationsbereich S3/D9 und die Querstörung der Ammerbek, untergeordnet auch – nach einem schichtparallelen Transport im Rötanhydrit – entlang anderen Störungszonen
- nach dem Übertritt in den Muschelkalk Transport und Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre entlang der Pfade 13ff, eventuell auch 20ff gemäß der Kennzeichnung der Pfade in Kapitel 5.1.5
- kein oder nur ein untergeordnetes Hochpressen von kontaminierter Lösung in das verstürzte Deckgebirge / Hutgestein (Kompartiment 21), damit
- kein oder nur ein untergeordneter Transport und Freisetzung der Radionuklide in die Biosphäre entlang der Pfade 1ff (ohne Pfade 7 und 11) gemäß der Kennzeichnung der Pfade in Kapitel 5.1.5, mit geringem Transportanteil nach Westen gegen Groß Denkte
- Austritt von radioaktiven Gasspezies in den Rötanhydrit der Südflanke und dichtgetriebener Aufstieg in der Gasphase

Die derart definierte Szenariengruppe stellt die Szenariengruppe des Referenzszenarios dar, da für die FEP der Klasse B jeweils die wahrscheinlichere Annahme in Bezug auf Eintreten oder nicht Eintreten des FEP getroffen wird. Die Begründungen für die Annahmen sind in Kapitel 5 für die Geosphäre und in Kapitel 5 von [Colenco 2006c] für das Nahfeld bei der Definition und Diskussion der FEP gegeben. Für die Anwendung der PROSA-Methodik bildet die Gruppe dieser Entwicklungen die initiale Szenariengruppe (vgl. Kapitel 3).

Der erste Iterationsschritt gemäß PROSA-Methodik (vgl. Kapitel 3), die Zuweisung der standortspezifischen FEP zu einer der Kategorien „Primär-FEP“, „Transport-FEP“, „Variant-FEP“ oder „Übriger-FEP“, ist durch die in Kapitel 5 und 6 durchgeführten Vorarbeiten vereinfacht: Lediglich für die FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) ist noch festzulegen, ob sie bei der Szenariengruppe des Referenzszenarios zu unterstellen sind oder nicht. Das Ergebnis dieser Festlegung zeigt Anhang B.2. Nach der Einschätzung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten bzw. Nichteintreten der maßgebenden FEP in Kapitel 5 umfasst diese Szenariengruppe die Szenarien mit der höchsten Eintretenswahrscheinlichkeit.

Der zweite und dritte Iterationsschritt sind die Überprüfung, ob weitere FEP der Kategorie „Übriger-FEP“, d.h. weitere nicht berücksichtigte FEP, einbezogen werden können, ohne die Wirkungsweise des Multibarrierensystems qualitativ zu ändern, sowie ggf. die Erweiterung der Szenariengruppe. Das Ergebnis dieser Schritte ist in der oben formulierten Charakterisierung der Szenariengruppe und in Anhang B.2 bereits enthalten.

Streng genommen könnte wahrscheinlich sogar die alternative Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes (FEP 20.9) ohne qualitative Änderung der MBS-Wirkungsweise in die Referenzentwicklung einbezogen werden. Da die Auswirkungen einer Vergletscherung jedoch relativ komplex sind, wird diese für die Szenariengruppe der Referenzentwicklung ausgeschlossen und in einer gesonderten Szenariengruppe „Vergletscherung“ unterstellt (Kapitel 7.3.6).

Die Liste aller in der Szenariengruppe des Referenzszenarios zu unterstellenden FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) einschließlich der zugehörigen Variant-FEP enthält Anhang C.8. Die vollständige FEP-Liste für diese Szenariengruppe ergibt sich aus den

FEP der Klasse A (Anhang C.1) und den FEP der Klasse B in den Anhängen C.2 für das Nahfeld und C.8 für die Geosphäre.

Die für die Langzeitsicherheit wichtigsten Prozesse im Deckgebirge sind zum einen die zeitweilige Speicherung der kontaminierten Grubenlösung im Rötanhydrit, die temporäre Speicherung und Transportverzögerung durch Sorption im Röttaquitard – wobei die Sorption im Langzeitsicherheitsnachweis allerdings nicht belastet werden kann –, die Ausbreitung im Muschelkalk mit Dichteeinfluss sowie die Verdünnung im Muschelkalk und im oberflächennahen Grundwasserleiter. Von Bedeutung sind zum anderen das eventuelle Hochpressen einer gewissen Menge an Grubenlösung bis in das verstrüzte Deckgebirge sowie deren Ausbreitung entlang kurzer Wege in den Taleinschnitt östlich des Schachtes Asse 2 oder – mit längeren Transportpfaden – in die Nordflanke der Asse. Die maßgebenden Prozesse im Nahfeld sind in [Colenco 2006c] im Kapitel 7.2 (Nahfeld-Szenariengruppe des Referenzszenarios) aufgeführt.

Ein Weitertransport der Radionuklide mit dem regionalen Grundwasserfluss im Muschelkalk gegen Neindorf oder Thiede anstelle eines relativ lokalen Austritts wird nicht unterstellt, da die radiologischen Folgen eines Transportes über große Distanzen aufgrund der längeren Transportzeit geringer wären als bei einem kurzen Transport. Die Szenariengruppe mit relativ lokaler Freisetzung in die Biosphäre deckt somit den Fall eines weitreichenden Transportes ab.

Varianten der Szenariengruppe ergeben sich durch

- die Varianten für das Nahfeld, insbesondere
- die Raten und deren zeitliche Verläufe für den Austritt aus der Grube in das Deckgebirge von
 - Lösung
 - gelösten Radionukliden
 - Gas
 - radioaktiven Gasspezies
- die Variation der FEP, welche die Radionuklidausbreitung in der Südflanke bestimmen
- die Variation der FEP, welche den Anteil der in das verstrüzte Deckgebirge hochgepressten Grubenlösung und deren Ausbreitung bestimmen.

7.3.2

Geosphären-Szenariengruppe vD-W „verstrüztes Deckgebirge – West“

In den Szenarien der Geosphären-Szenariengruppe vD-W (verstrüztes Deckgebirge – West) sind die Verhältnisse im Deckgebirge, speziell die Permeabilitäten des Scherdeformationsbereichs S3/D9 (FEP 23.1.0.3) und der Störungszonen (FEP 23.2.0.2) im Röttaquitard so₂-so₄, einerseits und die Auspressrate von Lösung aus der Grube (FEP 10.14.0.1) andererseits derart, dass der größte Anteil der ausgepressten kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit und eventuell der Anhydritmittel in das verstrüzte Deckgebirge hochgepresst wird. Verstärkt durch eine zuvor erfolgte rasche Ausdehnung der Subrosionsgerinne am Salzspiegel gegen SE gelangt die hochgepresste Lösung vorwiegend in den Bereich westlich der unterirdischen Grundwasserscheide im verstrüzten Deckgebirge. In der Folge breiten sich die Radionuklide hauptsächlich und mit großer Geschwindigkeit in den Subrosionsgerinnen nach Westen bis

in das Gebiet von Groß Denkte aus. Dort werden sie mit dem natürlichen Grundwasserfluss an die Geländeoberfläche hochgeschleppt. Die Geosphären-Szenariengruppe vD-W unterscheidet sich von der Szenariengruppe des Referenzszenarios durch

- das Hochpressen des größten Teils der aus der Grube austretenden kontaminierten Grubenlösung in das verstürzte Deckgebirge, verbunden mit einem schichtparallelen Transport im Rötanhydrit in westlicher Richtung
- eine behinderte Ausbreitung von Grubenlösung durch den Rötquitard
- eine schnelle Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE, dadurch
- eine Verschiebung der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) gegen SE
- den Übertritt des größten Teils der in das verstürzte Deckgebirge hochgepressten kontaminierten Lösung NW der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) ins Kompartiment 21
- den Radionuklidtransport entlang der Subrosionsgerinne gegen Groß Denkte mit anschließendem Hochschleppen durch den natürlichen Grundwasserfluss und Freisetzung in die Biosphäre im Raum Groß Denkte

Anlage B.2 zeigt die wirksamen und die unwirksamen FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) für die Geosphären-Szenariengruppe vD-W. Die Liste aller in dieser Geosphären-Szenariengruppe zu unterstellenden FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) einschließlich der zugehörigen Variant-FEP enthält Anhang C.9. Die vollständige FEP-Liste für diese Szenariengruppe ergibt sich aus den FEP der Klasse A (Anhang C.1) und den FEP der Klasse B in den Anhängen C.2 und C.9.

Die für die Langzeitsicherheit wichtigsten Prozesse im Deckgebirge sind das Hochpressen des größten Teils der kontaminierten Grubenlösung ins verstürzte Deckgebirge und Hutgestein, deren Übertritt in das verstürzte Deckgebirge westlich der unterirdischen Grundwasserscheide, die Verdünnung mit unkontaminierten Salzwässern in den Subrosionsgerinnen, die für ein advektives Hochschleppen mit der natürlichen Grundwasserbewegung zur Geländeoberfläche erforderliche weitere Verdünnung mit Süßwasser oder gering salzhaltigem Wasser sowie der diffusive Aufstieg von Radionukliden zur Geländeoberfläche. Langzeitig veränderliche Randbedingungen für diese Prozesse ergeben sich aus der Abnahme der Höhendifferenz zwischen der Infiltrationszone auf dem Asse Höhenzug und der Exfiltrationszone bei Groß Denkte (FEP 21.2.0.3).

Wie für die Szenariengruppe des Referenzszenarios wird auch bei der Szenariengruppe vD-W kein weitreichender Transport gegen Neindorf oder Thiede unterstellt.

Varianten für diese Szenariengruppe ergeben sich durch

- die Varianten für das Nahfeld, insbesondere die Austrittsraten in das Deckgebirge (vgl. Auflistung in Kapitel 7.3.1)
- Variation der charakterisierenden Parameter für die verschiedenen Pfade zwischen dem Grubengebäude und dem Kompartiment 21, insbesondere die Leitfähigkeit der Anhydritmittel und damit die Aufteilung der hochgepressten Lösung auf die verschiedenen Übertrittsorte in das Kompartiment 21
- unterschiedliche Ausdehnungen der Subrosionsgerinne gegen SE (FEP 21.3)
- unterschiedliche Kapazität des natürlichen Grundwasserflusses für das Hochschleppen von salzhaltigem Wasser zur Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte (FEP 21.2)

7.3.3 Geosphären-Szenariengruppe vD-E „verstärktes Deckgebirge – Ost“

Die Szenariengruppe vD-E (verstärktes Deckgebirge – Ost) beruht auf der im vorangehenden Kapitel diskutierten Szenariengruppe vD-W und setzt damit ebenfalls das Hochpressen des größten Anteils der aus der Grube austretenden kontaminierten Lösung in das verstärkte Deckgebirge voraus. Sie unterscheidet sich von der Szenariengruppe vD-W durch den Umstand, dass sich die Subrosionsgerinne nicht oder nur wenig gegen SE ausdehnen und die hochgepresste kontaminierte Lösung vorwiegend SE der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) ins verstärkte Deckgebirge / Hutgestein übertritt. Von der Szenariengruppe vD-W unterscheidet sich die Szenariengruppe vD-E durch

- das Ausbleiben einer Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE
- den höchstens untergeordneten schichtparallelen Transports im Rötanhydrit gegen NW (FEP 22.5.2), z.B. durch Versatz des Rötanhydrit an Störungen
- den vorwiegenden Übertritt der hochgepressten kontaminierten Lösung SE der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) ins Kompartiment 21
- den Radionuklidtransport
 - durch Hochschleppen mit dem natürlichen Grundwasserfluss im verstärkten Deckgebirge zur Geländeoberfläche im Geländeeinschnitt entlang den Störungen Ammerbeek und Groß Vahlberg,
 - gegen E zum Einschnitt der Diagonalstörung von Groß Vahlberg mit Freisetzung in die Biosphäre an der NE-Flanke des Asse Höhenzuges oder
 - gegen S zum Einschnitt der Störungen der Ammerbeek mit Freisetzung in die Biosphäre an der SW-Flanke des Asse Höhenzuges

Wie bei der Szenariengruppe vD-W setzen die Szenarien dieser Gruppe hydraulische Verhältnisse voraus, die ein vorwiegendes Hochpressen von kontaminierter Lösung ins verstärkte Deckgebirge / Hutgestein zur Folge haben.

Anlage B.2 zeigt die wirksamen und die unwirksamen FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) für die Geosphären-Szenariengruppe vD-E. Die Liste aller in dieser Geosphären-Szenariengruppe zu unterstellenden FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) einschließlich der zugehörigen Variant-FEP enthält Anhang C.10. Die vollständige FEP-Liste für diese Szenariengruppe ergibt sich aus den FEP der Klasse A (Anhang C.1) und den FEP der Klasse B in den Anhängen C.2 und C.10.

Die für die Langzeitsicherheit wichtigsten Prozesse und Sachverhalte im Deckgebirge bei dieser Szenariengruppe sind neben jenen, die das vorwiegende Hochpressen von kontaminierter Lösung in das Kompartiment 21 beschreiben, der Grundwasserfluss im verstärkten Deckgebirge und Hutgestein am Ort des Übertritts der kontaminierten Lösung, die Ausbreitung der kontaminierten, schweren Lösung in Abhängigkeit vom örtlichen Abfallen des Salzspiegels, die Kapazität des natürlichen Grundwasserflusses für ein Hochschleppen von salzhaltigem Wasser unter dem Geländeeinschnitt entlang den Störungen Ammerbeek und Groß Vahlberg, die hydraulischen Kontakte zwischen dem Kompartiment 21 und den genannten Störungen sowie die hydraulischen Verhältnisse entlang der Störungen.

Varianten der Szenariengruppe ergeben sich durch

- die Varianten für das Nahfeld, insbesondere für die Austrittsraten in das Deckgebirge (vgl. Auflistung in Kapitel 7.3.1)

- die Richtung des Radionuklidtransports im verstürzten Deckgebirge / Hutgestein
- die Ausbildung der hydraulischen Kontakte zu den Störungen
- die hydraulischen Bedingungen an den Orten, wo die betroffenen Störungen die Grundwasserleiter schneiden.

7.3.4 Szenariengruppe vZdSB „vergrößerte Zone der desintegrierte Steinsalz-Barriere“

Die Geosphären-Szenariengruppe vZdSB (vergrößerte Zone der desintegrierte Steinsalz-Barriere) beruht auf der gleichnamigen Nahfeld-Szenariengruppe. Die Szenariengruppe unterscheidet sich bezüglich FEP der Klasse B (ohne Unterklassen B_G und B_N) von der Szenariengruppe des Referenzszenarios.

In der Szenariengruppe des Referenzszenarios reicht die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2) von 574 m bis 500 m Teufe. Durch weitere Verformungen im Wirtsgestein bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase kann sich die Zone vergrößern (FEP 15.2.0.2). In der Szenariengruppe vZdSB wird unterstellt, dass sich die Zone am Ende der frühen Nachbetriebsphase bis in den Firstbereich der 490-m-Sohle erstreckt, damit von 574 m bis 474 m Teufe reicht und dass Wegsamkeiten von der Grube in das Deckgebirge der Südflanke in 474 m Teufe existieren. Der Unterschied zu den Szenarien der Gruppe des Referenzszenarios ist somit:

- Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere von 574 m bis 474 m Teufe
- Existenz von hydraulischen Wegsamkeiten in 474 m Teufe von der Grube durch die Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke

Die wesentlichste Auswirkung dieser vom Referenzfall abweichenden Sachverhalte ist das frühere Entweichen von Gas aus der Grube in das Deckgebirge. In der Szenariengruppe des Referenzszenarios entweicht kein oder höchstens sehr wenig Gas entlang der Tagesschächte. Es muss sich im Grubenhöchsten ein Gaspolster mit einer Untergrenze in 500 m Teufe bilden, bevor Gas aus der Grube austreten kann. Dies verzögert den Gasaustritt aus der Grube und ist mit Verdrängen von Lösung verbunden. Das Auspressen von Lösung aus der Grube in das Deckgebirge ist im Referenzszenario deshalb stärker als in der Szenariengruppe vZdSB.

In Bezug auf den Transport gelöster Radionuklide mit der ausgepressten Grubenlösung im Deckgebirge unterscheidet sich die Szenariengruppe vZdSB jedoch nicht qualitativ von der Szenariengruppe des Referenzszenarios. Streng genommen besteht auch kein qualitativer Unterschied in Bezug auf das Austreten von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase und deren Aufstieg im Deckgebirge zur Geländeoberfläche. Durch das frühere Entweichen von Gas aus der Grube könnten die Verhältnisse aber derart stark vom Referenzszenario abweichen, dass eine spezielle Szenariengruppe auch für die Geosphäre gerechtfertigt erscheint.

Aus den Analysen zur Langzeitsicherheit für Endlager mit vergleichbaren Abfällen ist bekannt, dass das langlebigste volatile Radionuklid, welches in radiologisch nennenswerten Raten in die Biosphären gelangen kann, das Isotop ¹⁴C in der Form Methan ist. Seine Halbwertszeit beträgt rund 5'700 Jahre. Nach den Modellrechnungen zur Fluidausbreitung im Grubengebäude tritt Gas nach einigen 100 bis wenigen 1'000 Jahren aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge aus [ALSA-C 2005a]. Die Ausbreitung von radioaktiven Gasspezies braucht deshalb „nur“ einige 10'000 Jahre abzudecken,

so dass die FEP der geowissenschaftlichen Langzeitentwicklung außer Acht gelassen werden können.

Anlage B.2 zeigt die wirksamen und die unwirksamen FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) für die Szenariengruppe vZdSB. Die Liste aller in dieser Geosphären-Szenariengruppe zu unterstellenden FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) einschließlich der zugehörigen Variant-FEP enthält Anhang C.11. Die vollständige FEP-Liste für diese Szenariengruppe ergibt sich aus den FEP der Klasse A (Anhang C.1) und den FEP der Klasse B in den Anhängen C.5 für das Nahfeld und C.11 für die Geosphäre.

Die für die Langzeitsicherheit wichtigsten Prozesse und Sachverhalte im Deckgebirge sind der rasche, dichtegetriebene Aufstieg von Gas durch das Deckgebirge, die dabei ablaufenden 2-Phasen-Prozesse (Gaseindringdruck, Kapillardruck, relative Gaspermeabilität entsprechend der lokalen Gassättigung), Lösungs- und Ausgasungsprozesse in Wechselwirkung mit dem Porenwasser des Deckgebirges und die wahrscheinliche Kanalisierung des aufsteigenden Gases sowohl durch 2-Phasen-Prozesse als auch durch geologische Strukturen wie z.B. die Randstörungen des verstützten Deckgebirges. Die maßgebenden Prozesse im Nahfeld für die Szenariengruppe vZdSB sind in Kapitel 7.5 von [Colenco 2006c] aufgeführt.

Varianten der Szenariengruppe ergeben sich durch

- die Varianten für das Nahfeld, insbesondere für den Zeitpunkt und die Rate des Gasaustritts und des Austritts von ¹⁴C in das Deckgebirge
- die Eigenschaften der relevanten Bereiche des Deckgebirges in Bezug auf 2-Phasen-Prozesse

7.3.5 Szenariengruppe GTs „Gasabfluss entlang Tagesschächte“

Die Geosphären-Szenariengruppe GTs (Gasabfluss entlang Tagesschächte) beruht auf der gleichnamigen Nahfeld-Szenariengruppe. Die Szenariengruppe unterscheidet sich bezüglich FEP der Klasse B (ohne Unterklassen B_G und B_N) von der Szenariengruppe des Referenzszenarios.

In der Szenariengruppe des Referenzszenarios wird angenommen, dass entlang der Tagesschächte kein oder höchstens sehr wenig Gas aus der Grube entweicht. Dies entspricht der wahrscheinlichsten Systementwicklung (vgl. [Colenco 2006c]). Sofern der Gaseindringdruck des Schachtverschlusses (einschließlich Auflockerungszone) relativ niedrig ist oder der Fluiddruck im Grubengebäude aufgrund des hydraulischen Widerstandes im Deckgebirge übermäßig stark ansteigt, kann Gas entlang der Tagesschächte entweichen. In der Szenariengruppe GTs wird unterstellt, das Gas in erheblichem Maße entlang der Tagesschächte entweicht, bevor das Gaspolster im Grubenhöchsten die oberste Wegsamkeit durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere erreichen kann. Zudem wird angenommen, dass kein Gas durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke austritt. Der Unterschied zu den Szenarien der Gruppe des Referenzszenarios ist somit

- erheblicher Gasaustritt entlang der Tagesschächte und
- kein Gasaustritt durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke

In Bezug auf das Auspressen von Lösung aus der Grube in das Deckgebirge liegen die Szenarien der Gruppe GTs zwischen jenen der Gruppe des Referenzszenarios und jenen der Szenariengruppe vZdSB. Zum Austritt von Radionukliden in Lösung aus dem Grubengebäude und deren Ausbreitung im Deckgebirge ist deshalb nichts anzuführen, es wird auf die entsprechenden Kapitel 7.3.1 bis 7.3.4 verwiesen. Der einzige Unterschied zu diesen Szenariengruppen besteht im Umstand, dass der vorwiegende Austritt von radioaktiven Gasspezies nicht durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke sondern entlang eines oder beider Tagesschächte in das Hutgestein und das darüber liegende verstückte Deckgebirge erfolgt. Die Szenariengruppen unterscheiden sich damit qualitativ in Bezug auf die Ausbreitung der radioaktiven Gasspezies im Teilsystem Hutgestein/Deckgebirge.

Anlage B.2 zeigt die wirksamen und die unwirksamen FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) für die Szenariengruppe GTs. Die Liste aller in dieser Geosphären-Szenariengruppe zu unterstellenden FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) einschließlich der zugehörigen Variant-FEP enthält Anhang C.12. Die vollständige FEP-Liste für diese Szenariengruppe ergibt sich aus den FEP der Klasse A (Anhang C.1) und den FEP der Klasse B in den Anhängen C.6 für das Nahfeld und C.12 für die Geosphäre.

Die für die Langzeitsicherheit wichtigsten Prozesse und Sachverhalte im Deckgebirge sind in Abweichung von der Szenariengruppe vZdSB jene des dichtegetriebenen Aufstiegs von Gas entlang der Tagesschächte durch das Wirtgestein, das Hutgestein und das verstückte Deckgebirge. Dieser Gasaufstieg kann durch die Schachtverschlüsse in Bezug auf die Rate gedrosselt sein, er ist in Bezug auf die Transportgeschwindigkeit jedoch rascher und kanalisierter als jener entlang natürlichen Wegsamkeiten in der Szenariengruppe vZdSB. Von besonderer Bedeutung sind die Lösung von Gas im Porenwasser der Schachtverfüllung und der Übertritt aus dem verfüllten Schacht in das umgebende Deckgebirge. Die maßgebenden Prozesse im Nahfeld für die Szenariengruppe vZdSB sind in Kapitel 7.6 von [Colenco 2006c] aufgeführt.

Varianten der Szenariengruppe ergeben sich durch

- die Varianten für das Nahfeld, insbesondere für die Gasbildung und den Gasaufstieg im Grubengebäude bis zu den Schachtverschlüssen sowie die Radionuklidkonzentration in der Gasphase
- die Eigenschaften der Schachtverschlüsse und der Schachtverfüllung oberhalb der Schachtverschlüsse in Bezug auf 2-Phasen-Prozesse
- die hydrogeologischen Verhältnisse im verstückten Deckgebirge nahe der Tagesschächte

7.3.6 Szenariengruppe Vg „Vergletscherung des Standortes“

Die Geosphären-Szenariengruppe Vg (Vergletscherung des Standortes) beruht auf der gleichnamigen Nahfeld-Szenariengruppe. Die Szenariengruppe unterscheidet sich bezüglich FEP der Klasse B (ohne Unterklassen B_G und B_N) von der Szenariengruppe des Referenzszenarios.

Die Szenariengruppe Vg zeichnet sich durch eine Klimaentwicklung mit Vorstoß der Eisbedeckung von Norden über den Standort innerhalb der kommenden 150'000 Jahre, jedoch frühestens nach 100'000 Jahren, aus (Typ „Saale-Vereisung“, vgl. Kapitel

5.2.3). Unterschiede zu den vorstehend beschriebenen Szenariengruppen und damit Abweichungen in den radiologischen Auswirkungen treten dabei erst mit der Annäherung des Eisrandes gegen die Asse, damit erst nach frühestens rund 100'000 Jahren ein. Um eine möglichst abdeckende Gruppe von Szenarien zu definieren, wird zudem angenommen, dass vor dem Vorrücken des Gletschers über den Standort direkte Wegsamkeiten vom Grubengebäude zum Salzspiegel durch die Steinsalz-Barriere entstehen. Aufgrund des späten Zeitpunktes wird überdies angenommen, dass sich die Subrosionsgerinne bis zu den Tagesschächten ausgedehnt haben. Die Szenariengruppe Vg ist ab rund 100'000 Jahren charakterisiert durch

- Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes (FEP 20.9 anstelle von FEP 20.8)
- erfolgtes Absinken des Salzspiegels mit Nachstürzen des darüberliegenden Deckgebirges um einen Betrag, der zwischen 30 m und 100 m liegen dürfte
- entsprechende Verringerung der Höhendifferenz zwischen Infiltrationsgebieten und Exfiltrationsgebieten (vgl. Diskussion in Kapitel 5.2.2), jedoch
- erhöhter Grundwasserfluss im Deckgebirge, insbesondere nahe der Geländeoberfläche durch hydraulische Wechselwirkung mit dem Kluftwasser in der Eisbedeckung (FEP 20.7.0.3, FEP 21.2.0.5)
- Ausdehnung der Subrosionsgerinne nach SE bis zu den Tagesschächten
- hydraulische Wegsamkeiten vom Grubengebäude sowohl ins Deckgebirge in der Südflanke als auch nach oben in das verstürzte Deckgebirge, letztere entstanden im Zusammenhang mit Permafrost (FEP 15.22)

Anlage B.2 zeigt die wirksamen und die unwirksamen FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) für die Szenariengruppe Vg. Die Liste aller in dieser Geosphären-Szenariengruppe zu unterstellenden FEP der Klasse B (ohne Unterklasse B_N) einschließlich der zugehörigen Variant-FEP enthält Anhang C.13. Die vollständige FEP-Liste für diese Szenariengruppe ergibt sich aus den FEP der Klasse A (Anhang C.1) und den FEP der Klasse B in den Anhängen C.7 für das Nahfeld und C.13 für die Geosphäre.

Die für die Langzeitsicherheit wichtigsten Prozesse und Sachverhalte sind – neben den oben aufgeführten FEP – die Stützwirkung des Versatzes im Grubengebäude zum Zeitpunkt des Gletschervorstoßes, der davon abhängende Anstieg der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude, die veränderten Höhen- und Teufenlagen von Geländeoberfläche und Salzspiegel und die unterstellten höheren hydraulischen Gradienten im verstürzten Deckgebirge / Hutgestein (FEP 20.7.0.3 und 21.2.0.5). Nach der Diskussion der Prozesse bei einer Vergletscherung in Kapitel 5.2.3 dürfte bei dieser Szenariengruppe nur die Phase des Gletschervorstoßes von Interesse sein, d.h. die Zeitperiode, während der die Eislast am Standort schon wirkt, sich im Eis dort aber noch kein Wasserkörper aufgebaut hat. Die maßgebenden Prozesse im Nahfeld für die Szenariengruppe Vg sind in Kapitel 7.7 von [Colenco 2006c] aufgeführt.

Varianten der Szenariengruppe ergeben sich durch

- die schichtquerenden hydraulischen Permeabilitäten im Röttaquitard und damit die Aufteilung der ausgepressten Lösung aus dem Grubengebäude auf die Pfade in den Muschelkalk einerseits und ins verstürzte Deckgebirge / Hutgestein andererseits
- das Ausmaß, mit dem der Salzspiegel bis zur Vergletscherung abgesunken ist

- die Leitfähigkeit der Subrosionsgerinne im Bereich der Schachtanlage

7.4 Kombinationen von Szenariengruppen für das Nahfeld und die Geosphäre

Szenariengruppen für das Nahfeld und die Geosphäre können kombiniert werden, falls sie für die FEP der Klasse B, welche weder der Unterklasse B_N noch B_G angehören, in gleicher Weise Wirksamkeit bzw. Unwirksamkeit unterstellen. Sofern einzelne dieser FEP zwar unterschiedlich, aber ausschließlich auf den Schadstofftransport in der Gasphase wirken, können die entsprechenden Szenariengruppen wenigstens für den Transport von Radionukliden in Lösung kombiniert werden. Dies wurde am Ende von Kapitel 7.2 erläutert. Tabelle 7-1 zeigt die möglichen Kombinationen der identifizierten Szenariengruppen für das Nahfeld und die Geosphäre gestützt auf diese Überlegung sowie die Wirksamkeiten der FEP der Klasse B (ohne Unterklassen B_N und B_G) in den Szenariengruppen. Die Wirksamkeiten dieser FEP in den einzelnen Szenariengruppen sind in den Anhängen B.1 und B.2 aufgeführt. Eine graue Schattierung kennzeichnet dort die FEP der Klasse B, welche weder der Unterklasse B_N noch B_G angehören.

		Nahfeld					
		Ref-N	acM	LsgMAW	vZdSB	GTs	Vg
Geosphäre	Ref-G	X	X	X			
	vD-W	X	X	X	L	L	
	vD-E	X	X	X	L	L	
	vZdSB				X		
	GTs					X	
	Vg						X

Tabelle 7-1: Mögliche Kombinationen der Szenariengruppen für das Nahfeld und die Geosphäre. „X“ bezeichnet die möglichen Kombinationen ohne Einschränkung, „L“ die möglichen Kombinationen eingeschränkt auf den Radionuklidtransport in Lösung im Hutgestein und Deckgebirge

8 Schlussfolgerungen

Die in Kapitel 7 entwickelten Szenariengruppen für die Geosphäre unterscheiden sich zusammenfassend wie folgt:

Szenariengruppe des Referenzszenarios	<ul style="list-style-type: none"> - Nahfeld-Szenariengruppe des Referenzszenarios - vorherrschender Transport der Radionuklide in Lösung durch den Röttaquitard in den Muschelkalk, kein oder untergeordnetes Hochpressen von kontaminierter Lösung ins verstürzte Deckgebirge / Hutgestein - Hochschleppen von salz- und radionuklidhaltiger Lösung zur Geländeoberfläche durch den natürlichen Grundwasserfluss - vorwiegender Übertritt der Radionuklide in Lösung in die Biosphäre in der Südflanke der Salzstruktur im Nahbereich des Asse Höhenzugs - Austritt der Radionuklide in der Gasphase über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in den Rötanhydrit und Aufstieg durch das Deckgebirge zur Geländeoberfläche
Geosphären-Szenariengruppe vD-W	<ul style="list-style-type: none"> - Nahfeld-Szenariengruppe des Referenzszenarios - Hochpressen des größten Teils der aus dem Grubengebäude ausgetretenen kontaminierten Lösung ins verstürzte Deckgebirge / Hutgestein mit vorwiegendem Übertritt in die Subrosionsgerinne - Transport in den Subrosionsgerinnen in den Raum Groß Denkte, dort Hochschleppen von salz- und radionuklidhaltiger Lösung zur Geländeoberfläche durch den natürlichen Grundwasserfluss - Freisetzung der Radionuklide in Lösung in die Biosphäre im Raum Groß Denkte - Übertritt der Radionuklide in der Gasphase und Ausbreitung im Deckgebirge wie im Referenzszenario - Fortschreitende Subrosion mit Absinken des Salzspiegels und Abnahme der Höhendifferenz zwischen Infiltrations- und Exfiltrationsgebieten am Asse Höhenzug
Geosphären-Szenariengruppe vD-E	<ul style="list-style-type: none"> - Nahfeld-Szenariengruppe des Referenzszenarios - Hochpressen des größten Teils der aus dem Grubengebäude ausgetretenen kontaminierten Lösung ins verstürzte Deckgebirge / Hutgestein mit vorwiegendem Übertritt ins verstürzte Deckgebirge SE der unterirdischen Grundwasserscheide - Hochschleppen von salz- und radionuklidhaltiger Lösung in den Geländeeinschnitt entlang der Störungen Ammerbeek und Groß Vahlberg durch den natürlichen Grundwasserfluss im verstürzten Deckgebirge mit Frei-

	<p>setzung in diesem Geländeeinschnitt und/oder</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transport der Radionuklide im verstürzten Deckgebirge gegen die Diagonalstörung Groß Vahlberg mit Übertritt in die Biosphäre in der Nordflanke und/oder - Transport der Radionuklide im verstürzten Deckgebirge gegen die Störungen der Ammerbeek mit Übertritt in die Biosphäre in der Südflanke - Übertritt der Radionuklide in der Gasphase und Ausbreitung im Deckgebirge wie im Referenzszenario - Fortschreitende Subrosion mit Absinken des Salzspiegels und Abnahme der Höhendifferenz zwischen Infiltrations- und Exfiltrationsgebieten am Asse Höhenzug
Szenariengruppe vZdSB	<ul style="list-style-type: none"> - Szenariengruppe vZdSB für das Nahfeld - Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke zwischen 574 m und 474 m Teufe mit Existenz von Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere in 474 m Teufe - Austritt von Radionukliden in Lösung und in der Gasphase durch diese Zone in den Rötanhydrit - Radionuklidausbreitung im Deckgebirge wie in der Szenariengruppe des Referenzszenarios
Szenariengruppe GTs	<ul style="list-style-type: none"> - Szenariengruppe GTs für das Nahfeld - verminderter Gaseindringdruck des Schachtverschlusses (einschließlich Auflockerungszone) - erheblicher Gasaustritt entlang einem oder beiden Tagesschächten - kanalisierter, dichtegetriebener Aufstieg der radioaktiven Gasspezies entlang der Tagesschächte durch das verstürzte Deckgebirge - kein Gasaustritt durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere - im Übrigen gleich wie Szenariengruppe des Referenzszenarios
Szenariengruppe Vg	<ul style="list-style-type: none"> - Szenariengruppe Vg für das Nahfeld - Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes innerhalb der kommenden 150'000 Jahre, jedoch frühestens nach rund 100'000 Jahren, damit - bis rund 100'000 Jahren gleich wie Szenariengruppe des Referenzszenarios - Entstehung von neuen Wegsamkeiten vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Bildung von Klüften in der Steinsalz-Barriere im Zusammenhang mit Permafrost nach rund 100'000 Jahren - Absinken des Salzspiegels mit Nachstürzen des darüber liegenden Deckgebirges um 30 m bis 100 m bis zur Vergletscherung des Standortes - Ausdehnung der Subrosionsgerinne nach SE bis zu

den Tagesschächten

- Erhöhte Auflast während des Vordringens des Eisrandes mit verstärkter Auspressung von kontaminierter Lösung aus dem Grubengebäude
 - eventuell kurzfristiges Auspressen von kontaminierter Lösung entlang der neuen Wegsamkeiten direkt in das verstürzte Deckgebirge
 - Übertritt von Radionukliden durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in den Rötanhydrit
 - Ausbreitung von Radionukliden durch den Röttaquitard in den Muschelkalk
 - Hochpressen eines erheblichen Teils der Radionuklide in das verstürzte Deckgebirge und Transport entlang der Subrosionsgerinne gegen Groß Denkte
-

Die Szenariengruppen für das Nahfeld werden in [Colenco 2006c] entwickelt, sie sind in Kapitel 7.2 kurz beschrieben. Folgende Nahfeld-Szenariengruppen werden unterschieden:

- Szenariengruppe des Referenzszenarios
- Nahfeld-Szenariengruppe acM „abweichendes chemisches Milieu in den Einlagerungsbereichen“
- Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW „Lösungszutritt in den Fasskegel in der MAW-Kammer“
- Szenariengruppe vZdSB „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“, in Verbindung mit der gleichnamigen Geosphären-Szenariengruppe
- Szenariengruppe GTs „Gasabfluss entlang Tagesschächte“, in Verbindung mit der gleichnamigen Geosphären-Szenariengruppe
- Szenariengruppe Vg „Vergletscherung des Standortes“, in Verbindung mit der gleichnamigen Geosphären-Szenariengruppe

Die Entwicklung der Nahfeld- und Geosphären-Szenariengruppen beruht auf einer ausführlichen Systembeschreibung und der daraus abgeleiteten Asse-spezifischen FEP-Liste. Letztere wurde durch Vergleich mit internationalen FEP-Listen auf Vollständigkeit überprüft. Die Entwicklung der Szenariengruppen erfolgte nach der PROSA-Methodik. Dazu wurden die FEP zusätzlich zur Kategorisierung nach PROSA in Primär-FEP, Transport-FEP und Variant-FEP in die folgenden Klassen unterteilt:

- A in allen Szenarien zu berücksichtigende FEP
- B FEP, die nur in einem Teil der Szenarien unterstellt werden und damit zwischen Szenariengruppen differenzieren, mit den Unterklassen
 - B_N FEP der Klasse B, die nur im Teilsystem „Nahfeld“ (ohne Wirtsgestein) wirken
 - B_G FEP der Klasse B, die nur im Teilsystem „Hutgestein/Deckgebirge“ wirken
- C FEP, die entweder aufgrund ihrer Auswirkungen oder ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in keinem Szenario zu unterstellen sind

Mit der Zusatzklassierung einzelner FEP der Klasse B in die Unterklassen B_N und B_G kann sich die Szenarientwicklung nach PROSA auf folgende FEP konzentrieren:

- Szenarientwicklung Nahfeld: FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G
- Szenarientwicklung Geosphäre: FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N

Das Ergebnis zeigen der Anhang B.1 für das Nahfeld und der Anhang B.2 für die Geosphäre, welche alle FEP dieser Klasse/Unterklassen mit ihrer Berücksichtigung bzw. Nicht-Berücksichtigung in den Szenariengruppen aufführen. Aus den Anhängen B.1 und B.2 ist ersichtlich, dass die Szenariengruppen für die beiden Teilsysteme abdeckend sind.

Die möglichen Kombinationen zwischen den Szenariengruppen für das Nahfeld und die Geosphäre sind in Kapitel 7.4 in Tabellenform dargestellt. Die drei Szenariengruppen für das Nahfeld „Referenz“, „acM“ und „LsgMAW“ können beliebig mit den drei Szenariengruppen für die Geosphäre „Referenz“, „vD-W“ und „vD-E“ kombiniert werden. Zusätzlich lassen sich in Bezug auf die Radionuklidenausbreitung mit der ausgepressten Lösung im Deckgebirge die beiden Szenariengruppen „vZdSB“ und „GTs“ mit den Geosphären-Szenariengruppen „vD-W“ und „vD-E“ kombinieren.

Nachfolgend werden die identifizierten Szenariengruppen, einschließlich jener für das Nahfeld, nochmals zusammenfassend diskutiert und hinsichtlich ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit bewertet.

Szenariengruppen für das Nahfeld

Jede der Nahfeld-Szenariengruppen deckt aufgrund der großen Zahl an maßgebenden Parametern ein breites Spektrum der möglichen Entwicklungen des Teilsystems Asse-Nahfeld ab. Dies gilt insbesondere für die Szenariengruppe des Referenzszenarios.

In qualitativer Hinsicht unterscheiden sich die möglichen Entwicklungen des Nahfeldes demgegenüber nicht so stark. Entsprechend niedrig ist auch die Zahl der für den Langzeitsicherheitsnachweis zu unterstellenden Szenariengruppen. Neben der Szenariengruppe des Referenzszenarios sind es fünf alternative Szenariengruppen.

Die alternative Nahfeld-Szenariengruppe acM beruht auf der Annahme, dass aus hier nicht näher einzugrenzenden Gründen in einem oder mehreren Einlagerungsbereichen keine Rückhaltung von Radionukliden durch Löslichkeit und/oder Sorption stattfindet. Solche Verhältnisse sind wenig wahrscheinlich, denn die Schließungsmaßnahmen haben zum Ziel, das geochemische Milieu in den Einlagerungsbereichen derart zu kontrollieren, dass ausgewählte sicherheitsrelevante Radionuklide zurück gehalten werden. Dies kann ausbleiben, falls die Mengenverhältnisse von Lösung, Mg-Depot (Brucit-Depot und Brucit in Suspension), Zement und Eisen deutlich von den Planwerten abweichen, die CO_2 -Bildung wesentlich größer ist oder aufgrund unwirksamer Strömungsbarrieren der Lösungsaustausch im Einlagerungsbereich deutlich rascher erfolgt. Eine weitere Ursache könnte sein, dass aufgrund wenig wahrscheinlicher, spezieller hydraulischer Verhältnisse im Einlagerungsbereich Radionuklide durch Lösungspakete ausgetragen werden, die weder vor noch nach der Aufnahme der Radionuklide im erforderlichen Ausmaß mit den die geochemischen Verhältnisse bestimmenden Stoffen in Kontakt geraten. Das Eintreten der alternativen Szenariengruppe acM ist wenig wahrscheinlich.

Eine weitere alternative Nahfeld-Szenariengruppe (LsgMAW) betrifft ausschließlich den Fasskegel in der MAW-Kammer. Während im Referenzszenario zu Beginn der Nachbetriebsphase ausreichend Grubenluft in deren Nahbereich (Kammern 8a/532 und 8b/532) eingeschlossen ist, um beim weiteren Anstieg des Fluiddrucks im Grubengebäude ein Ansteigen des Lösungspegels bis in den Fasskegel zu verhindern, wird in der alternativen Szenariengruppe LsgMAW eine abweichende Annahme getroffen: Die alternative Szenariengruppe LsgMAW beruht auf der Annahme, dass beim Einleiten von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke die Grubenluft rasch aus dem Nahbereich der MAW-Kammer entweicht und Lösung in großem Maße in den Nahbereich zutritt. Mit dem ansteigenden Fluiddruck in der Grube zu Beginn der Nachbetriebsphase steigt dann der Lösungspegel bis in eine nennenswerte Höhe des Fasskegels in der MAW-Kammer. Damit geraten die MAW in Kontakt mit Lösung und Radionuklide werden – im Unterschied zum Referenzszenario – in erheblichem Maße mobilisiert, teilweise eingeschränkt durch Löslichkeit und Sorption. Durch den Lösungskontakt ist auch die Gasbildung stärker als in der Szenariengruppe des Referenzszenarios. Diese Gasbildung verdrängt die – mittlerweile kontaminierte – Lösung wieder aus der MAW-Kammer in deren Nahbereich, von wo sie nach Verdünnung mit unkontaminierter Lösung durch Gasspeicherung und Konvergenz in den durchströmten Teil des Baufeldes in der Südflanke ausgepresst wird. Nach speziellen Modellrechnungen zur Lösungs- und Gasbewegung im Nahbereich der MAW-Kammer mit dem 2-Phasen-Programm TOUGH2 ist ein Lösungszutritt bis in eine nennenswerte Höhe des Fasskegels in der MAW-Kammer wenig wahrscheinlich [Colenco 2006d], für den Nachweis der Langzeitsicherheit sollte er aber in der alternativen Szenariengruppe LsgMAW betrachtet werden. Dieser Szenariengruppe kann eine geringe bis mäßige Eintrittswahrscheinlichkeit zugewiesen werden.

Die alternative Szenariengruppe vZdSB unterstellt eine Wegsamkeit im Firstbereich der obersten Sohle der Grube durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke. Im Gegensatz zur Szenariengruppe des Referenzszenarios entweicht dadurch Gas aus der Grube, ohne vorgängig ein relativ mächtiges Gaspolster zu bilden und dabei zusätzlich Lösung aus der Grube zu verdrängen. Die Auswirkungen auf den Radionuklidtransport in der Grube und das Auspressen von Radionukliden in Lösung aus der Grube können in der Tendenz ungünstig sein. Sie sind es sicher in Bezug auf das Austreten von Radionukliden in der Gasphase in das Deckgebirge, da dieses früher einsetzt. Die Eintretenswahrscheinlichkeit dieser alternativen Szenariengruppe wird als mäßig eingeschätzt.

Die alternative Szenariengruppe GTs beschreibt den Fall, dass der Gaseindringdruck eines oder beider Schachtverschlüsse (einschließlich ihrer Auflockerungszonen) ausreichend niedrig ist, um Gas in erheblichem Maße entlang der Tagesschächte entweichen zu lassen, bevor das Gaspolster im Grubenhöchsten die oberste Wegsamkeit durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke erreicht. In Bezug auf den Radionuklidtransport in Lösung wird diese Szenariengruppe durch jene des Referenzfalls und die Gruppe vZdSB abgedeckt. Die Szenariengruppe GTs braucht deshalb lediglich in Bezug auf den Transport von radioaktiven Gasspezies und deren Ausbreitung im Hutgestein und im verstürzten Deckgebirge berücksichtigt zu werden (vgl. zugehörige Geosphären-Szenariengruppe). Der erforderliche Gasdruck für Gasaustritt entlang der Schachtverschlüsse und der angrenzenden Auflockerungszonen hängt einerseits von deren Permeabilität (genauer: von deren Poren- und Mikrorisstruktur) und andererseits von ihrem Lösungs-Sättigungsgrad zum Zeitpunkt des ansteigenden Gasdrucks im Grubengebäude ab. Beide Einflüsse sind mit Ungewissheiten verbunden. Ob der Gaseindringdruck in der Nachbetriebsphase überwunden wird, hängt zudem von der Konvergenz und dem hydraulischen Widerstand des Deckgebirges ab, welcher dem Auspressen von Lösung aus der Grube in das Deckgebirge

der Südflanke entgegenwirkt. Nach den Ergebnissen von Modellrechnungen in Vorbereitung von [ALSA-C 2005a] setzt ein starker Gasfluss entlang der Tagesschächte unabhängig von den übrigen Einflussfaktoren eine Leitfähigkeit der Schachtverschlüsse (einschließlich Auflockerungszone) voraus, die gegenüber den Planwerten deutlich erhöht ist. Aus diesem Grund wird die Eintretenswahrscheinlichkeit der Szenariengruppe GTs trotz der genannten Ungewissheiten als gering eingestuft.

Die fünfte alternative Szenariengruppe Vg geht von einer Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes innerhalb der kommenden 150'000 Jahre, frühestens jedoch nach 100'000 Jahren, aus. Die Systementwicklung in dieser Szenariengruppe weicht erst mit dem Vorstoßen des Eisrandes gegen den Standort, d.h. frühestens ab rund 100'000 Jahren, von der Entwicklung in der Szenariengruppe des Referenzszenarios ab. Abhängig von den dann im Grubengebäude noch vorhandenen Mengen an Lösung und Radionukliden, der mittlerweile erreichten Stützwirkung des Versatzes und den Verhältnissen im Deckgebirge (vgl. zugehörige Geosphären-Szenariengruppe) könnte die zusätzliche Auflast durch den Gletscher erneut signifikante Austritte von Radionukliden aus der Grube und deren Ausbreitung bis zur Geländeoberfläche hervorrufen. Nach den Ausführungen in [Colenco 2005a] ist die Vergletscherung des Standortes während der nächsten Eiszeit und damit die Szenariengruppe Vg weniger wahrscheinlich als die Szenariengruppe des Referenzszenarios.

Die Szenariengruppe des Referenzszenarios und die fünf alternativen Nahfeld-Szenariengruppen weisen jede für sich ein breites Spektrum an Szenarien auf, die sich durch quantitativ unterschiedliche Sachverhalte und Prozessraten, d.h. Systemparameter, unterscheiden. Gemeinsam decken sie die möglichen Entwicklungen des Teilsystems Nahfeld während des Betrachtungszeitraumes von 150'000 Jahren ab.

Szenariengruppen für die Geosphäre

Die Szenariengruppen für die Geosphäre unterscheiden sich zum einen in Bezug auf die Ausbreitungspfade von Radionukliden mit ausgepresster Grubelösung im Deckgebirge, zum anderen in Bezug auf den Austritt von Radionukliden in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge und zum dritten in Bezug auf die klimatische Entwicklung.

Ob und in welchem Ausmaß kontaminierte Lösung entlang des Rötanhydrit (und eventuell der Anhydritmittel) in das verstückte Deckgebirge hochgepresst wird oder nicht, hängt einerseits von den Permeabilitäten im Rötanhydrit und entlang schichtquerender Pfade durch den Röttaquitard in den Muschelkalk und andererseits von der Lösungsauspressrate aus dem Grubengebäude zum Zeitpunkt ab, zu dem der Übertritt von Schadstoffen mit der Lösung in das Deckgebirge einsetzt. Von Bedeutung sind zudem der Höhenunterschied der Grundwasserspiegel im verstückten Deckgebirge und im Muschelkalk sowie der Dichteunterschied zwischen der ausgepressten Lösung und dem Gebirgswasser im Röt an der Südflanke der Salzstruktur.

Die Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Deckgebirge [Colenco 2006b] zeigen, dass für ein breites Spektrum an möglichen Verhältnissen im Deckgebirge und Auspressraten aus dem Grubengebäude kontaminierte Lösung in das verstückte Deckgebirge hochgepresst wird, allerdings nur zu einem geringen Anteil und über eine begrenzte Zeit. Die beiden alternativen Szenariengruppen vD-W und vD-E, in denen der größte Anteil der in das Deckgebirge ausgepressten Lösung in das verstückte Deckgebirge gelangt, sind deshalb als sehr unwahrscheinlich einzustufen.

Die beiden Szenariengruppen vZdSB und GTs beruhen auf den entsprechenden Nahfeld-Szenariengruppen und wurden hinsichtlich ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit bereits oben diskutiert. Für die Geosphäre unterscheiden sie sich nur in Bezug auf die Ausbreitung von Radionukliden in der Gasphase von der Szenariengruppe des Referenzszenarios. In der Szenariengruppe vZdSB treten Gas und radioaktive Gasspezies früher und in etwas geringerer Tiefe als in der Szenariengruppe des Referenzszenarios in den Rötanhydrit der Südflanke über. Der Aufstieg im Deckgebirge erfolgt – wie im Referenzszenario – zunächst entlang des Rötanhydrit und dann im verstückten Deckgebirge, abhängig von den vorhandenen Strukturen und den hydraulischen Parametern, nicht zuletzt auch den 2-Phasen-Parametern. In der Szenariengruppe GTs treten Gas und radioaktive Gasspezies entlang einem oder beiden Tagesschächten direkt in das Hutgestein und verstückte Deckgebirge über. Je nach der Verfüllung der Tagesschächte oberhalb der Schachtverschlüsse im Steinsalz und den hydraulischen Verhältnissen in den Schachtumgebungen erfolgt der Aufstieg stärker kanalisiert als in der Szenariengruppe des Referenzszenarios und in der Szenariengruppe vZdSB. Dies führt in der Tendenz zu höheren Strahlenexpositionen in der Biosphäre. In Abhängigkeit von der gaswirksamen Permeabilität der Schachtverschlüsse bzw. der angrenzenden Auflockerungszonen können die Gasaustrittsraten andererseits deutlich geringer sein als jene in die Südflanke in den anderen Szenariengruppen.

Die Szenariengruppe Vg (Vergletscherung des Standortes) beschreibt eine alternative Entwicklung des Systems ab rund 100'000 Jahren. Aufgrund der Einschätzung der künftigen Klimaentwicklung ist sie weniger wahrscheinlich als die Gruppe des Referenzszenarios. Die hinsichtlich Langzeitsicherheit wichtigste Phase ist die Zeitperiode unmittelbar vor und nach dem Vorrücken der Eismasse über den Standort. Die wichtigsten Prozesse wurden oben genannt.

Die möglichen Ausbreitungspfade von Radionukliden in Lösung im Deckgebirge sind vielfältig: Ausbreitung (1) in der Südflanke des Asse Höhenzuges, (2) im verstückten Deckgebirge / Hutgestein gegen Groß Denkte oder (3) ausgehend vom verstückten Deckgebirge / Hutgestein lokal zur Geländeoberfläche, gegen die Störungen von Groß Vahlberg oder der Ammerbeek. Die weiteren Verzweigungen der Transportpfade hängen hauptsächlich von den hydraulischen Verhältnissen an den folgenden Orten ab:

- im verstückten Deckgebirge / Hutgestein über der Schachtanlage Asse II
- in den Schnittregionen der relevanten Störungen mit den Grundwasserleitern Muschelkalk (in der Südflanke) und Rogenstein (in der Nordflanke)

Die Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Deckgebirge [Colenco 2006b] zeigen, dass in allen realistischerweise zu betrachtenden Fällen eine Ausbreitung entlang sämtlichen Pfaden stattfindet, die in diesem Bericht als mögliche signifikante Ausbreitungspfade identifiziert wurden. Unterschiedlich sind die relativen Bedeutungen der einzelnen Pfade.

Radionuklide treten in Grubenlösung in das Deckgebirge über. Selbst wenn bei der Mischung von Grubenlösung mit Deckgebirgslösung Mineralausfällungen stattfinden, ist die radionuklidhaltige Lösung zunächst schwerer als radionuklidfreie Deckgebirgslösung. Dies beeinflusst die Ausbreitung der Radionuklide im Deckgebirge. Mit weiter fortschreitender Vermischung gleicht sich die Dichte der radionuklidhaltigen Lösung an jene der unbeeinflussten Deckgebirgslösung an, bei gleichzeitiger Abnahme der Radionuklidkonzentration in Lösung. Damit Radionuklide am Ende eines Ausbreitungspfades durch das Deckgebirge zur Geländeoberfläche gelangen können, müssen sie vom lokalen natürlichen Grundwasserfluss entgegen der Dichtewirkung hochgeschleppt werden. Dies setzt aufwärts gerichtete natürliche Wasserflüsse voraus. Je ge-

ringer diese sind, umso niedriger muss die Dichte der radionuklidhaltigen Lösung, d.h. umso stärker muss diese verdünnt sein. Bei sehr geringen aufwärts gerichteten natürlichen Wasserflüssen gelangen die Radionuklide nur noch durch Diffusion zur Geländeoberfläche.

Langfristig wird der Salzspiegel durch Subrosion weiter absinken, das Deckgebirge darüber nachstürzen und die Höhendifferenz zwischen Infiltrations- und Exfiltrationszonen am Asse Höhenzug abnehmen. Als Folge dieser Prozesse wird die Subrosionsrate deutlich kleiner werden. Die Auswirkungen dieser Prozesse und ihrer Wechselwirkung über lange Zeiten wurden in [Colenco 2005a] abgeschätzt. Sie sind vor allem für die Radionuklidverbreitung nach langen Zeiten von Bedeutung, wenn durch eine Vergletscherung des Standortes das Auspressen von radionuklidhaltiger Lösung aus der Grube möglicherweise reaktiviert wird. Wegen der langfristig kleiner werdenden Höhendifferenz zwischen Infiltrations- und Exfiltrationszonen sind nach Rückzug der Eismassen die aufwärts gerichteten Grundwasserflüsse geringer als heute, wodurch die Dichte und damit auch die Radionuklidkonzentrationen in hochgeschleppten salzhaltigen Wässern abnehmen.

Die Rückhaltung von Radionukliden im Deckgebirge hängt nicht nur von den maßgebenden Sorptionsparametern sondern auch von der mikroskopischen Ausbildung der Wegsamkeiten im Deckgebirge ab. Die möglichen Ausbreitungspfade führen praktisch ausschließlich durch Kluftwasserleiter. In diesen findet der advective Transport in durchströmten Strukturen wie Klüften, Rissen etc. statt, die geringe Fließquerschnitte und entsprechend hohe Abstandsgeschwindigkeiten aufweisen. Das Gebirgswasser im angrenzenden Porenraum, dem Porenraum der sogenannten Gesteinsmatrix, bewegt sich praktisch nicht. Radionuklide diffundieren bei Vorliegen eines entsprechenden Konzentrationsunterschieds aus den durchströmten Strukturen in das stagnierende Porenwasser der Gesteinsmatrix, wo sie je nach Eigenschaften des Radionuklids und der geochemischen und mineralogischen Verhältnisse zusätzlich durch Sorption immobilisiert werden. Nach Rückgang der Radionuklidkonzentration in der durchströmten Struktur treten sie wieder aus der Matrix in die durchströmte Struktur über und werden weiter transportiert. Dieser Prozess – Matrixdiffusion genannt – bewirkt eine erhebliche Verzögerung gegenüber dem Transport mit der Abstandsgeschwindigkeit in den durchströmten Strukturen. Beim Transport über größere Distanzen im Muschelkalk ist Matrixdiffusion sicher von Bedeutung, die Bedeutung bei kürzeren Transportstrecken kann jedoch nur mit Daten zu den mikroskopischen Ausbildungen der Wegsamkeiten und detaillierten Modellrechnungen bewertet werden. Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption wird beim Transport im Deckgebirge stattfinden, im Nachweis der Langzeitsicherheit kann sie nach dem heutigen Kenntnisstand aber nicht belastet werden.

Die Szenariengruppe des Referenzszenarios und die alternativen Geosphären-Szenariengruppen weisen ein breites Spektrum an Szenarien auf, die sich durch qualitativ und quantitativ unterschiedliche Sachverhalte und Prozessraten, d.h. Systemparameter, unterscheiden. Gemeinsam decken sie die möglichen Entwicklungen des Teilsystems Hutgestein und Deckgebirge am Standort Asse während des Betrachtungszeitraumes von 150'000 Jahren ab.

Die oben genannten und in Tabelle 7-1 explizit aufgeführten möglichen Kombinationen der Nahfeld- und Geosphären-Szenariengruppen decken die möglichen Zustände und Entwicklungen des Systems Asse im Hinblick auf den Nachweis der Langzeitsicherheit ab.

9 Literaturverzeichnis

- [ALSA-C 2005a] Projekt Langzeitsicherheit Asse – Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse, Colenco Power Engineering AG (Baden, Schweiz), NRG Petten (Petten, Niederlande), D. Buhmann (GRS), J.B. Grupa (NRG), J. Hart (NRG), J. Mönig (GRS), A.D. Poley (NRG), J. Poppei (Colenco), G. Resele (Colenco), ALSA-C-1.5B-NR145, 27.07.2005
- [Colenco 2005a] Geowissenschaftliche Langzeitprognose, Bericht 4927/01 (Überarbeitung Juni 2005), Colenco Power Engineering AG, Juni 2005
- [Colenco 2005b] Schachtanlage Asse – Funktion der Strömungsbarrieren hinsichtlich Begrenzung der Schadstoffausbreitung in der Schachtanlage Asse sowie hydraulische Anforderungen an die Bauwerke, Colenco Power Engineering AG, Colenco-Bericht 3331/59, Mai 2005
- [Colenco 2006a] Hydrogeologische Modellvorstellungen, Bericht 4956/07 (Revision 2006), Colenco Power Engineering AG, November 2006
- [Colenco 2006b] Deckgebirgsmodellierung Phase IV – Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Standortes Asse, Colenco Power Engineering AG, Bericht 3331/71, September 2006
- [Colenco 2006c] Schachtanlage Asse – Szenarienentwicklung Nahfeld (Revision 2006), Colenco Power Engineering AG, Baden, Schweiz, Colenco-Bericht 3331/98, November 2006
- [Colenco 2006d] Lösungs- und Gasbewegung beim Einlagerungsbereich MAW in der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase – Modellrechnungen mit dem Programm TOUGH2, Colenco Power Engineering AG, Bericht 3331/76 (Revision 3), Oktober 2006
- [DBETec 2006a] Konzeptplanung Verfüllung und Verschluss der Schächte 2 und 4 des Bergwerks Asse, Rev. 01, Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, DBE Tec / GSF FB Asse, Stand: Sptember 2006
- [Ercosplan 2003] Geochemische Bewertung der Salzlösungszutritte im Bergwerk Asse II, A. Jockel, H. Rauche (Ercosplan Ingenieurgesellschaft mbH), H. Voigt und W. Voigt (TU Bergakademie Freiberg), A. Schwandt (Erfurt), 11.04.2003
- [Ercosplan 2004] Zusammenfassung der geologischen Grundlagen für die Langzeitsicherheitsbewertung der Schachtanlage Asse II, Ercosplan Ingenieurgesellschaft mbH, H.-J. Franzke (TU Clausthal) und A. Schwandt (Erfurt), Juni 2004
- [GRS 2006] Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk – Vorschlag der GRS, B. Baltes, K.-J. Röhling, A. Kindt, GRS Bericht GRS, Stand 01.06.2006
- [Grupa 1999] J.B. Grupa: The PROSA methodology for scenario development. paper presented at the NEA Workshop on Scenario Development, madrid, May 1999 (in [OECD 2001])
- [GSF 2002b] Potenzielle hydraulische Wegsamkeiten im Wirtsgestein im Bereich von Asse II durch Bohrungen, GSF – FB Asse, B. Förster, G. Hensel & R. Wallmüller, Remlingen, 24.11.2002

- [GSF 2003a] Zusammenstellung und Bewertung der vor 1988 im Grubengebäude der Schachanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase. Bericht, Rev. 02; GSF FB Asse, Mai 2003
- [GSF 2005a] Technisches Konzept zum Bau von Strömungsbarrieren basierend auf Erfahrungen aus dem Bau der Pilotströmungsbarriere, GSF – FB Asse, L. Teichmann (DBE Tec), T. Meyer (DBE Tec), M. Heydorn, Rev. 03, Dezember 2005
- [GSF 2006a] Zusammenstellung und Bewertung der ab 1988 im Grubengebäude der Schachanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase, GSF – FB Asse, N. Stockmann, G. Marggraf, T. Taylor, L. Teichmann (DBE Technology), M. Heydorn, G. Hensel, Rev. 3, März 2006
- [GSF 2006b] Konzeptionelles Modell für die Verfüllung der Einlagerungsbereiche, GSF – FB Asse, B. Förster, G. Marggraf, Rev. 0, März 2006
- [GSF 2006c] Herleitung und Beschreibung des Konzepts zur Schließung der Schachanlage Asse. GSF-FB Asse, Eikmeier, V.; Förster, B.; Hensel, G.; Kappei, G.; Stockmann, N.; Teichmann, L. (DBE Tec), Rev. 05, Oktober 2006
- [IfG 2006a] Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase, Kamlot, P.; Brückner, D.; Lindert, A.; Günther, R.-M., IfG Leipzig, Rev. 02, Oktober 2006
- [IfG 2006b] Gebirgsmechanische Langzeitprognose für die Schachanlage Asse. Kamlot, P.; Brückner, D.; Lindert, A.; Günther, R.-M.; IfG Leipzig, Bericht IfG-19/2003, Rev. 02, Oktober 2006
- [OECD 2000] Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste – An International Database, OECD Paris, 2000
- [OECD 2001] Scenario Development Methods and Practice. An Evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development (Madrid 1999), OECD Paris, 2001
- [Prij 1993] J. Prij et al.: PROSA. Probabilistic Safety Assessment. Final Report. Petten, November 1993
- [Schmidt 2006] Geochemische Untersuchungen zur Herkunft salinärer Lösungen – Sr- und Pb-Isotope als Tracer in Lösungen der Schachanlage Asse, K.H. Schmidt, TU Clausthal, Januar 2006
- [SKB 1994] T. Eng, J. Hudson, O. Stephanson, K. Skagius, M Wiborgh: Scenario development methodologies. SKB Technical Report 94-28, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden, November 1994
- [SSK 1988] Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle – Gemeinsame Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 84. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 30. Juni 1988
- [USDOE 1996] Title 40 CFR Part 191 Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant. US Department of Energy, Carlsbad Area Office, New Mexico, USA

[Voigt 2003]

Berechnung von physikalisch-chemischen Daten und Volumenbilanzen bei der Mischung von Q-Lösung mit Anhydrit/Halit-gesättigten Lösungen, W. Voigt, TU Bergakademie Freiberg, ohne Datum

Exemplar für BMBF und BMU

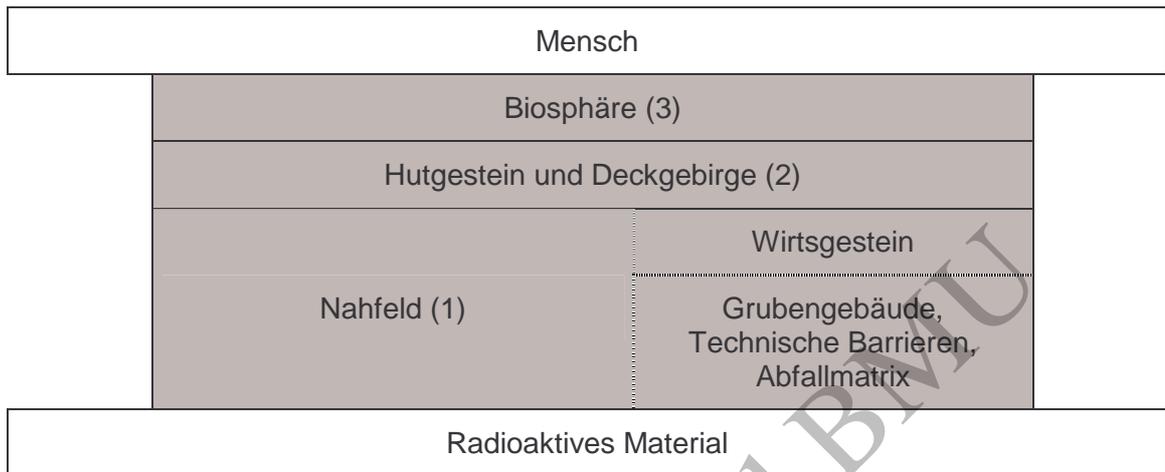
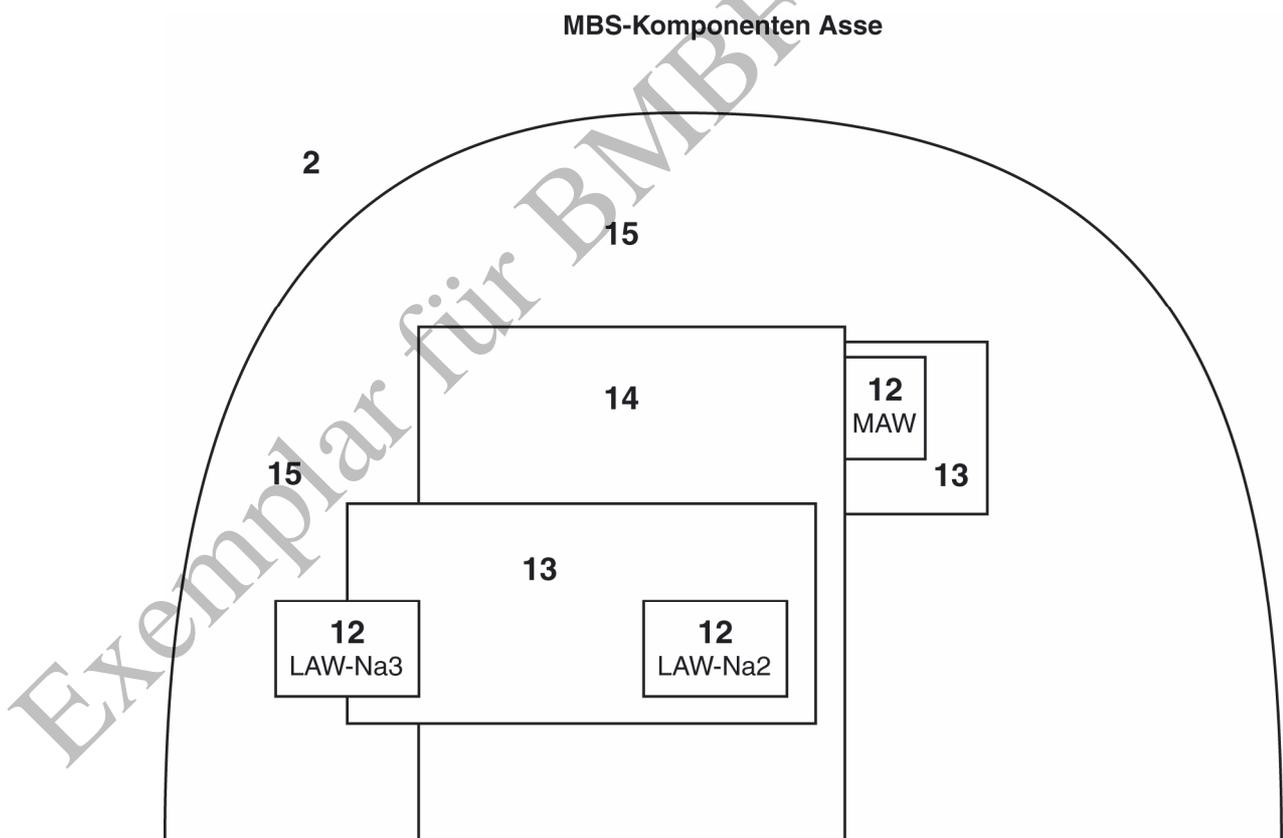
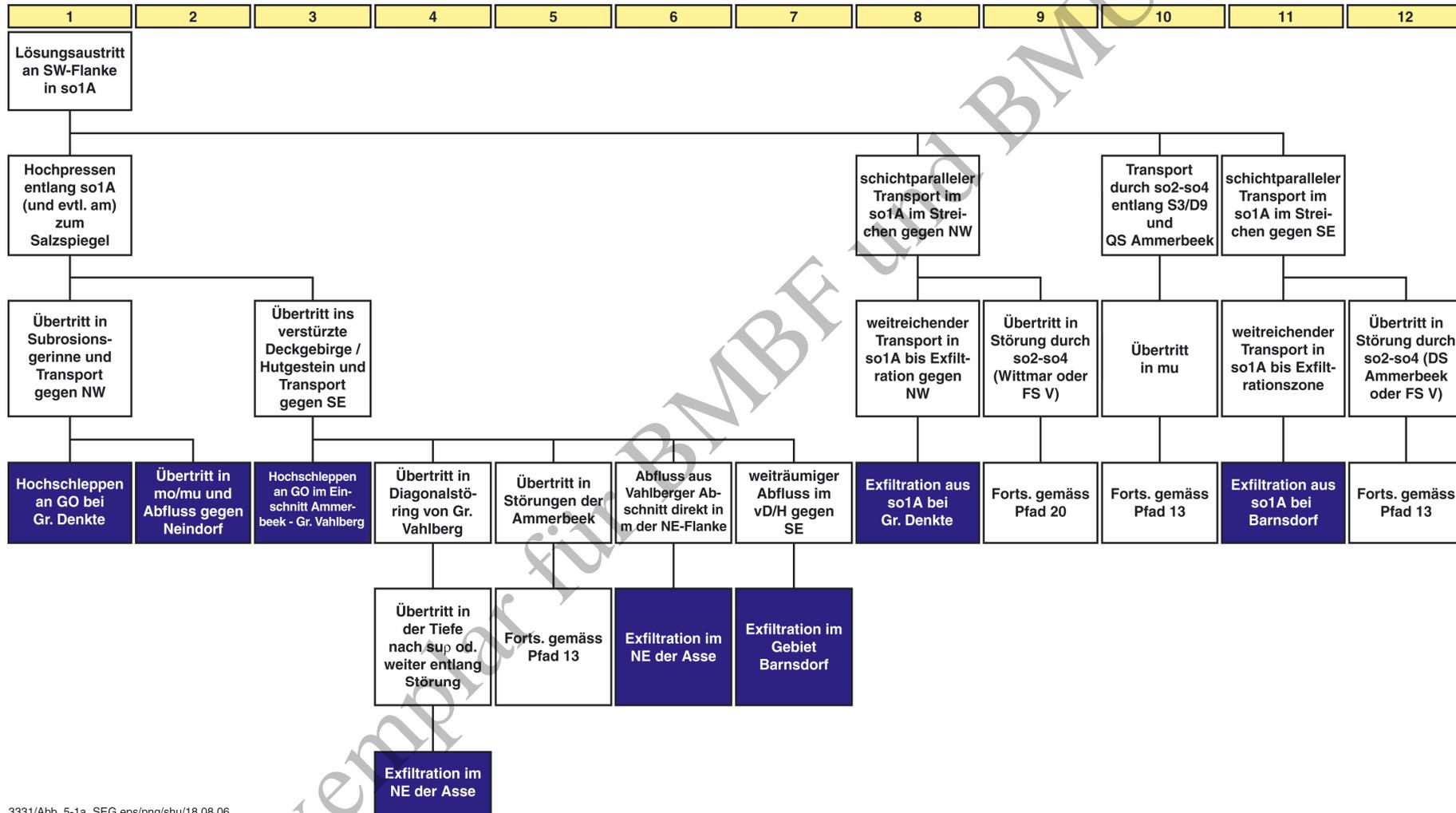


Abbildung 4-1: Unterteilung des Multibarrierensystems (MBS) in die einzelnen Teilsysteme



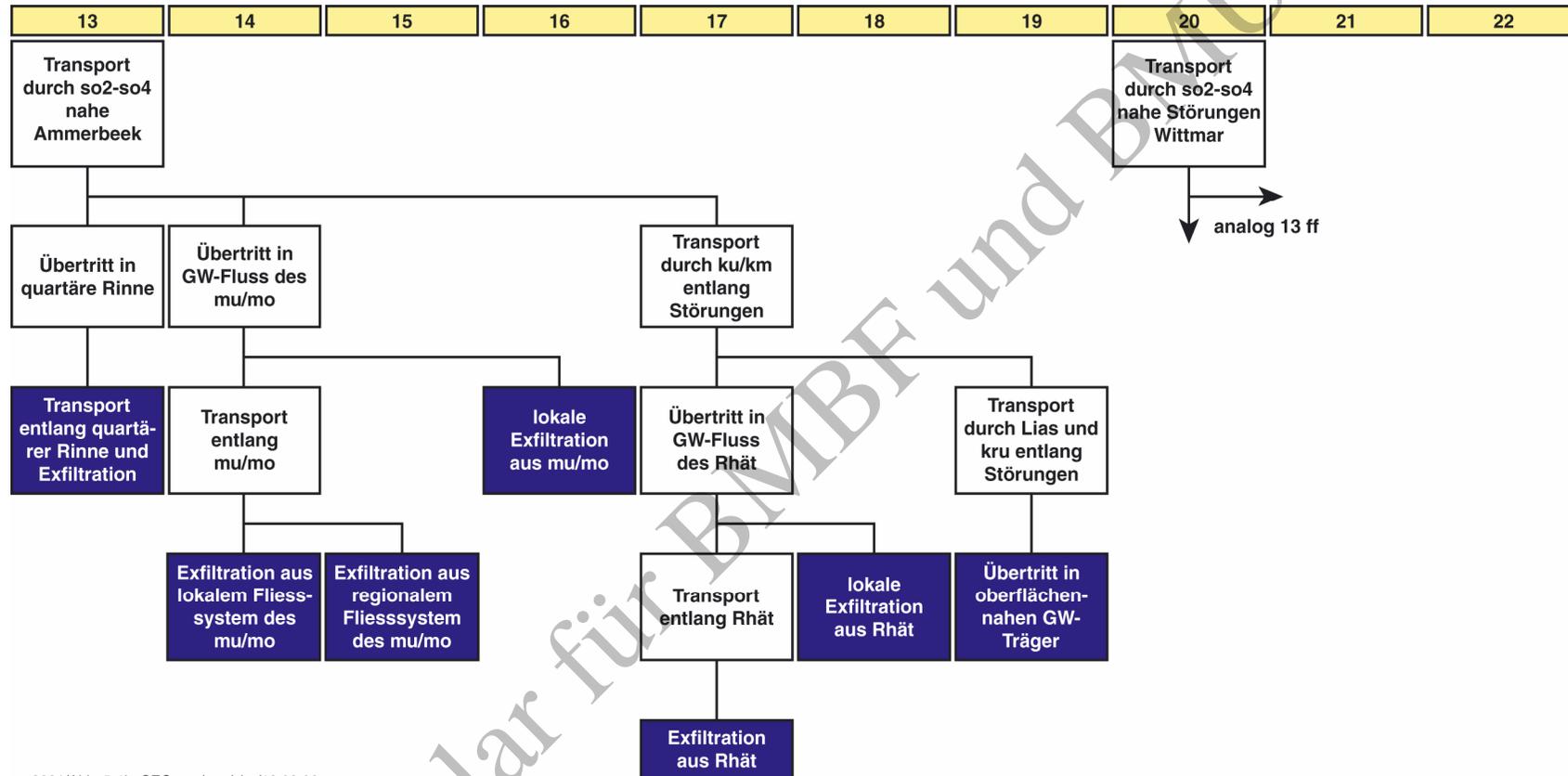
3331/seg_senf/abb_4-2_SEG.eps/png/shu/27.09.06

Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der topologischen Anordnung der Nahfeld-Kompartimente



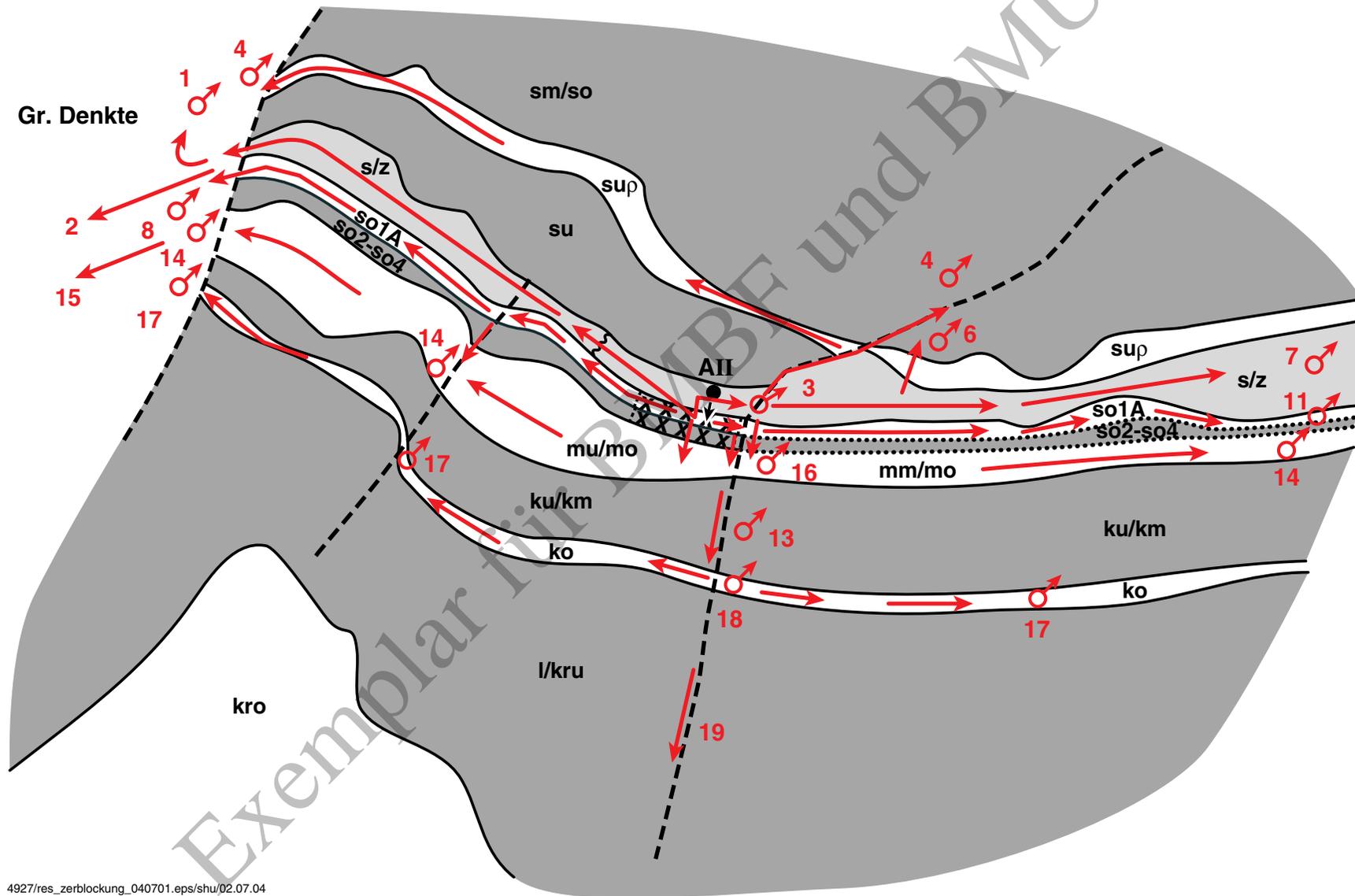
3331/Abb_5-1a_SEG.eps/png/shu/18.08.06

Abbildung 5-1a: Schematisches Diagramm der potentiellen Fließwege für den Transport von Radionukliden in Lösung durch die Geosphäre



3331/Abb_5-1b_SEG.eps/png/shu/18.08.06

Abbildung 5-1b: Schematisches Diagramm der potentiellen Fließwege für den Transport von Radionukliden in Lösung durch die Geosphäre (Fortsetzung)



4927/res_zerblockung_040701.eps/shu/02.07.04

Abbildung 5-2: Schematische Skizze der potentiellen Fließwege für den Transport von Radionukliden in Lösung im Deckgebirge

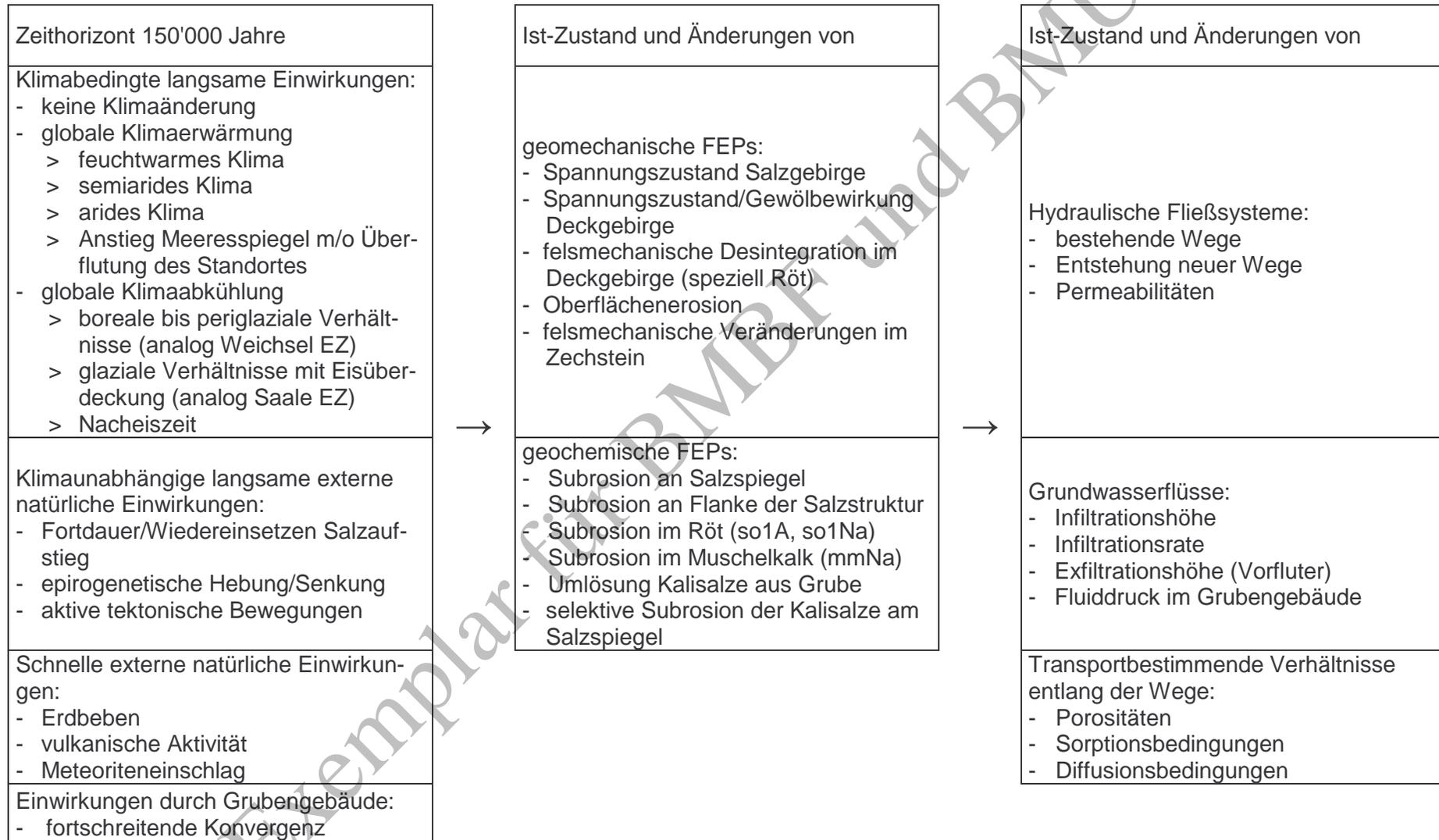


Abbildung 5-3: Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und langzeitsicherheitsrelevanten FEP

Wahrscheinlichkeit		Geologische/Hydrogeologische FEP										FS									
		Spannungszustand Deckgebirge	Felsmech. Desintegration DG	Oberflächenerosion	Spannungszustand Salzgebirge	Felsmech. Änderungen Zechstein	Subrosion Salzspegel	Subrosion Flanke	Subrosion Röt	Subrosion Muschelkalk	Selekt. Subrosion Kalisalze	Umlösung Kalisalze aus Grube	FS I: Deckgebirge-Subrosionsrinne	FS II: Muschelkalk schichtparallel	FS III: Rogenstein + subrod. soNa	FS IV: Störungen (diskret) quer	FS V: Schichtquerend (diffus, geogen)	FS VIa: Schichtquerend bergbaubedingt	FS VIb: soA schichtpar. bergbaubed.	FS VIc: so1A schichtpar. nicht bergbaubed.	FS VII: Regional
	Klimabedingte Einwirkungen																				
+	Entwicklung analog Weichsel EZ	0	0	+/-	0	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	
-	Entwicklung analog Saale EZ	---	-	---	0	0	---	-	+/-	+/-	-	0	-	-	-	+/-	+/-	+/-	0	-	-
+/-	Nacheiszeit	0/-	+/-	--	0/-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	
--	Feuchtwarmes Klima	0	0	+/-	0	0	-	0	0	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	
--	Semiarides Klima	0	0	---	0	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	
---	Arides Klima	0	0	+/-	0	0	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	
--	Anstieg Meeresspiegel o Überflutung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
---	Anstieg Meeresspiegel m Überflutung	+	+	++	+	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	
--	Keine Klimaänderung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Langsame klima-unabhängige Einwirkungen																				
+	Fortdauer heutige Salzbewegung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
---	Verstärkter Salzaufstieg	+/-	--	--	--	--	--	0	0	0	--	0	--	0	0	0	--	--	+/-	+/-	+/-
---	Epirogenetische Hebung	0	0	0/-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	Epirogenetische Senkung	0	0	+	0	0	0	0/+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	Aktive tektonische Bewegungen	--	--	--	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Schnelle klima-unabhängige Einwirkungen																				
--	Erdbeben	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	Vulkanische Aktivität nahe Standort	0	0	--	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+/-
---	Meteoriteneinschlag nahe Standort	0	---	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
	Einwirkungen Grubengebäude																				
+	Rasch abklingende Konvergenz	+	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
---	Anhaltende Konvergenz	---	---	0	---	---	0	0/-	0	0	0	0/+	0	0	0	0	0	---	---	0	0

Wahrscheinlichkeit

Einwirkungen im Vergleich zum heutigen Zustand:

+	hoch
+/-	unbekannt
--	gering
---	sehr gering

++	Stark positive Wirkung bezüglich LZS
+	Nennenswert positive Wirkung bezüglich LZS
+/-	Einfluss mit unterschiedlicher Richtung möglich
--	Nennenswert negative Wirkung bezüglich LZS
---	Stark negative Wirkung bezüglich LZS
0	Keine oder vernachlässigbare Wirkung bezüglich LZS

Stark verminderte Perm./Fluss
Nennenswert verminderte Perm./ Fluss
Unterschiedliche Änderungen mögl.
Nennenswert erhöhte Perm./ Fluss
Stark erhöhte Perm./ Fluss
Keine oder vernachlässigb. Änderung

Abbildung 5-4: Einfluss-Matrix der geologischen/hydrogeologischen FEP zur Langzeitentwicklung

Anhang A: Asse-spezifische FEP-Liste

Entsprechend ihrer Bedeutung für die Langzeitsicherheit und für die Differenzierung von Szenariengruppen lassen sich die FEP wie folgt klassieren:

A in allen Szenarien zu berücksichtigende FEP

B FEP, die nur in einem Teil der Szenarien unterstellt werden und damit zwischen Szenariengruppen differenzieren

B_N FEP der Klasse B, die nur im Teilsystem „Nahfeld“ (ohne Wirtsgestein) wirken

B_G FEP der Klasse B, die nur im Teilsystem „Hutgestein und Deckgebirge“ wirken

C FEP, die nie zu unterstellen sind, sei es, weil ihr Eintreten ausreichend unwahrscheinlich ist oder weil die Auswirkung auf die Langzeitsicherheit vernachlässigbar gering ist

Die Klassierung wird systematisch für die Primär- und Transport-FEP angegeben. Die Klassierung der Variant-FEP ist nur aufgeführt, falls sie von jener des zugehörigen Primär- oder Transport-FEP abweicht.

[P:\3331_ge\SEG_SENF_2006\BE_3331_98 u 99_V3_Anh.doc], Speicherdatum: 29.11.2006

FEP	Beschreibung	Kategorie
Teilsystem 1: „Nahfeld“		
Übergeordnete FEP		
10.1	Geometrie des Grubengebäudes	A
10.1.0.1	Änderungen der Grubengeometrie durch Konvergenz	-
10.1.0.2	Änderungen der Grubengeometrie durch Lösungsprozesse	C
10.2	Spannungszustand im Wirtsgestein und im Tragsystem Grubengebäude	A
10.2.0.1	Ansteigen der Gebirgsspannung während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort	B _N
10.2.0.2	langfristige Zunahme des Gebirgsdrucks und Abnahme von Hauptspannungsdifferenzen im Grubengebäude durch Konvergenz und zunehmende Kompaktion des Salzversatzes	-
10.3	Tragfähigkeit des Tragsystems Grubengebäude	A
10.3.0.1	durchfeuchteter Anteil des Salzgesteins mit verminderter Tragfähigkeit	-
10.3.0.2	Charakteristik der Tragfähigkeit von durchfeuchtetem Salzgestein	-
10.3.0.3	Charakteristik der Tragfähigkeit von Salzversatz	-
10.3.0.4	Verminderung der Tragfähigkeit durch Verformung des Tragsystems	-
10.3.0.5	Verminderung der Tragfähigkeit als Folge der Umlösung am Carnallit durch Schutzfluid (FEP 10.21)	C
10.3.0.6	späte Verminderung der Tragfähigkeit durch Umlösung am Carnallit durch MgCl ₂ -untersättigte Lösung oberhalb 574 m Teufe	C
10.3.0.7	langfristige Zunahme der Tragfähigkeit durch wachsende Kompaktion des Salzversatzes	-
10.3.0.8	Verminderung der Tragfähigkeit des Systems im LAW-Nahbereich als Folge von FEP 13.12	C
10.4	Lösungszutritt aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude	A
10.4.0.1	Rate des Lösungszutritts aus dem Deckgebirge	-
10.4.0.2	NaCl-Sättigung der Lösung aus dem Deckgebirge beim Eintritt in die Wegsamkeit FEP 15.6	-
10.4.0.3	MgCl ₂ - und MgSO ₄ -Konzentration der Lösung aus dem Deckgebirge beim Eintritt in die Wegsamkeit FEP 15.6	-
10.4.0.4	Rückgang des Lösungszutritts aus dem Deckgebirge nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks (FEP 10.33) und während des Einleitens von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke	-
10.4.0.5	Zutrittsrate von MgCl ₂ -untersättigter Lösung aus dem Deckgebirge in der späten Nachbetriebsphase	C
10.4.0.6	Lösungszutritt nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23	B _N
10.5	Einleiten von Schutzfluid in das Grubengebäude	A
10.5.0.1	Schutzfluid-Einleitrate	-
10.5.0.2	chemische Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids beim Einleiten	-
10.5.0.3	chemische Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids bei Gebirgstemperatur	-
10.6	Konvergenz des Grubengebäudes	A
10.6.0.1	Erhöhte Konvergenzrate durch Feuchtekiechen nach Einleiten des Schutzfluids	-
10.6.0.2	Verringerung der Konvergenzrate durch den Fluiddruck	-

FEP	Beschreibung	Kategorie
10.6.0.3	Rate der Trockenkonvergenz	-
10.6.0.4	Konvergenzrate während der mittleren und späten Nachbetriebsphase	-
10.6.0.5	örtliche Variabilität der Konvergenzrate aufgrund von unterschiedlichen Spannungsverhältnissen und Gesteinseigenschaften	-
10.6.0.6	örtliche und zeitliche Variabilität der Konvergenzrate durch hydraulische Änderungen des Fluiddrucks	-
10.6.0.7	späte Erhöhung der Konvergenzrate infolge Umlösung am Carnallit durch $MgCl_2$ -untersättigte Lösung oberhalb 574 m Teufe	C
10.6.0.8	Ansteigen der Konvergenzrate während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort	B _N
10.7	Porosität des Salzversatzes (ortsabhängig)	A
10.7.0.1	Abnahme der Porosität des Salzversatzes durch Konvergenz während des Einleitens von Schutzfluid (Feuchtekriechen)	-
10.7.0.2	Abnahme der Porosität des Salzversatzes durch Konvergenz in der Nachbetriebsphase	-
10.8	Nachsacken des Salzversatzes beim Einleiten des Schutzfluids	A
10.8.0.1	Verminderung der Permeabilität der Versatzkörper durch Nachsacken beim Einleiten des Schutzfluids	-
10.8.0.2	erhöhte Leitfähigkeit von Firstspalten	-
10.9	Stützwirkung des Schutzfluids	A
10.9.0.1	Druck des Schutzfluids (ortsabhängig)	-
10.9.0.2	Anstieg des Fluiddrucks im Grubengebäude während der frühen Nachbetriebsphase	-
10.9.0.3	örtlich unterschiedlicher hydraulischer Druckanstieg in Grubenbauen als Folge von Strömungswiderständen in der Grube	-
10.9.0.4	hydraulisch bedingter Druckanstieg im Grubengebäude als Folge des hydraulischen Widerstandes im Deckgebirge	-
10.9.0.5	hydraulisch bedingter Druckanstieg im Grubengebäude als Folge des Dichteanstiegs im Deckgebirge	C
10.9.0.6	langfristige Abnahme des hydraulischen Drucks im Grubengebäude durch Verminderung des Oberflächenreliefs	-
10.9.0.7	erhöhter hydraulischer Druck im Grubengebäude während einer Vereisung des Standortes	B _N
10.10	Nachlösung beim Angleichen der Schutzfluid-Temperatur an die Gebirgstemperatur	C
10.11	Mischen von Grubenlösung und zutretender Deckgebirgslösung im Grubengebäude sowie Mineralausfällungen in der Mischzone	A
10.11.0.1	Grad des Vermischens	-
10.12	Einschichten von $MgCl_2$ -untersättigter Lösung über dem Schutzfluid im Grubengebäude	C
10.12.0.1	Mächtigkeit von $MgCl_2$ -untersättigter Lösung im Grubenhöchsten	-
10.13	dichtebedingtes Austreten von Lösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge	C
10.13.0.1	dichtebedingte Lösungsaustrittsrate während des Schutzfluid-Einleitens und während der frühen und mittleren Nachbetriebsphase	-
10.13.0.2	dichtebedingte Lösungsaustrittsrate während der späten Nachbetriebsphase	-
10.14	Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge durch Konvergenz und Gasbildung	A
10.14.0.1	Rate des Lösungsaustritts aus der Grube in das Deckgebirge in der Nachbetriebsphase	-

FEP	Beschreibung	Kategorie
10.14.0.2	Rückgang der Lösungsauspressrate nach Einsetzen des Gasaustritts aus der Grube	-
10.15	dichtebedingter Unterschied des vertikalen Druckgradienten im Grubengebäude und im Deckgebirge an der Flanke des Grubengebäudes	A
10.15.0.1	vertikaler Druckgradient im Grubengebäude	-
10.16	Gasexplosion	C
10.17	Lösung von Gas im Schutzfluid	A
10.17.0.1	Abnahme der Gasphase durch Lösung von Gas im Schutzfluid	C
10.17.1	Lösung von radioaktiven Gasen	A
10.18	Gasspeicherung im Porenraum des Salzversatzes	A
10.18.0.1	residuale Gassättigung im Salzversatz	-
10.18.0.2	Abnahme der Gasspeichervolumina im Salzversatz durch Konvergenz	-
10.19	Gasspeicherung in der Firstrauhigkeit	A
10.19.0.1	Gasspeichervolumen in der Firstrauhigkeit	-
10.20	Gasauftstieg im Nahbereich und im übrigen Grubengebäude	A
10.20.0.1	lokale Gasspeichervolumina im Nahbereich und im übrigen Grubengebäude, abhängig von Anzahl und Querschnitt der Aufstiegszonen	-
10.20.0.2	Speisung der Gasphase durch Ausgasen der Lösung	C
10.21	Umlösung am Carnallit durch Schutzfluid	C
10.22	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte	A
10.22.0.1	kurzzeitige örtliche Unterschiede der Lösungsdichte aufgrund der Bandbreite der Schutzfluidzusammensetzung beim Einleiten	C
10.22.0.2	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte als Folge von Umlösung an Carnallit und an Steinsalz-Varietäten sowie aufgrund von Temperaturunterschieden	C
10.22.0.3	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte durch Zementkorrosion außerhalb der ELB	C
10.22.0.4	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte als Folge von FEP 10.11	-
10.22.0.5	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte als Folge des Austretens von Lösung abweichender Dichte aus den Einlagerungskammern (FEP 12.20)	-
10.23	Temperaturgradient im Grubengebäude	A
10.24	Zementkorrosion im Nahbereich der ELB und in der übrigen Grube	C
10.25	späte Umlösung am Carnallit durch $MgCl_2$ -untersättigte Lösung oberhalb 574 m Teufe	C
10.26	Lösungsbewegung im Grubengebäude durch Konvergenz und Gasspeicherung	A
10.27	dichtebedingte großräumige Lösungsbewegung im Grubengebäude (Konvektion)	C
10.28	langfristige Deformationen durch salzkinetische Bewegungen unabhängig von der Konvergenz	C
10.29	Freilegung des Grubengebäudes an der Geländeoberfläche	C
10.30	bruchhafte Verformungen durch Spannungsänderungen als Folge einer Vereisung des Standortes (außerhalb Zone FEP 15.2)	C
10.31	Bildung eines Gaspolsters im Grubenhöchsten	A
10.31.0.1	Teufe der Untergrenze des Gaspolsters im Grubenhöchsten	-
10.32	Lösungsverdrängung durch Bildung eines Gaspolsters im Grubenhöchsten	A
10.33	Pneumatischer Stützdruck im Grubengebäude während des Einleitens von Schutzfluid oberhalb der 700-m-Sohle	A
10.34	Austreten von Druckluft aus der Grube in das Deckgebirge nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks in der Grube	A

FEP	Beschreibung	Kategorie
-	Kompartiment 11: Abfall, Abfallmatrix, Abfallbehälter	
11.1	Radionuklidinventar der Abfälle	A
11.1.0.1	Radioaktiver Zerfall und Aufbau von Tochternukliden	-
11.1.0.2	Bildung von Helium und radioaktiven Gasen durch radioaktiven Zerfall	C
11.2	Konditionierung der Abfälle und Eigenschaften der Abfallmatrix	A
11.2.0.1	Porosität und Rissgefüge in zementierten und betonierten Abfallmatrizes	-
11.2.0.2	Veränderung der Abfallmatrix durch radioaktive Strahlung	C
11.3	Verpackung der Abfälle und Eigenschaften der Abfallbehälter	A
11.3.0.1	Ausmaß des Integritätsverlustes der VBA zum Zeitpunkt des Einleitens der Suspension in den ELB	-
11.3.0.2	Korrosionsrate der Fässer (Metallkorrosion)	-
11.3.0.3	mechanische Ausfallrate der Gebinde (insbesondere VBA) nach dem Einleiten der Suspension	-
11.3.0.4	Korrosionsrate von Zement der VBA	-
11.4	chemotoxisches Inventar der Abfallgebinde	A
11.5	gasbildendes Stoffinventar der Abfallgebinde	A
11.6	Gasbildung durch Abfallgebinde	A
11.6.0.1	eingeschränkte Gasbildung in der MAW-Kammer als Folge eines begrenzten Anstiegs des Lösungspegels im Fasskegel	B _N
11.6.0.2	Unterbrechung der Gasbildung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.3	B _N
11.7	Wärmeentwicklung der Abfälle durch radioaktiven Zerfall	C
11.8	Gasspeicherung in den Abfallgebinden	A
11.8.0.1	Gasspeichervolumen in den Abfallgebinden	-
11.9	Fehler bei der Abfalleinlagerung	C
11.10	Zementkorrosion	A
11.10.0.1	zeitlicher Fortschritt der Zementkorrosion	-
11.11	Lösungskontakt von Suspension und Abfall	A
11.11.0.1	Verzögerung des Lösungskontaktes durch VBA ohne anfänglichen Integritätsverlust (FEP 11.3.0.1)	-
11.11.0.2	vernachlässigbares Zutreten von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.29	B _N
11.11.0.3	Unterbrechung des Lösungskontaktes mit den Abfallgebinden in der MAW-Kammer durch Anwachsen des Gaspolsters	B _N
11.11.1	Mobilisierung durch Zersetzung der Abfallmatrix	A
11.11.1.1	Mobilisierungsrate und Verzögerung der Mobilisierung	-
11.11.1.2	eingeschränkte Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge eines begrenzten Anstiegs des Lösungspegels im Fasskegel	B _N
11.11.1.3	Unterbrechung der Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.3	B _N
11.11.1.4	vernachlässigbare Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.2	B _N
11.11.2	Mobilisierung durch Schadstoffdiffusion aus der Abfallmatrix	A
11.11.3	Mobilisierung gasförmiger Spezies durch Ausgasen der Abfälle	A
	Kompartiment 12: Einlagerungsbereich	
12.1	hydraulische Wegsamkeiten entlang Auffahrungen zwischen ELB und Nahbereich	A
12.1.0.1	hydraulischer Widerstand der Strömungsbarrieren	-

FEP	Beschreibung	Kategorie
12.1.0.2	hydraulischer Widerstand von Verbindungen ohne Strömungsbarrieren	-
12.1.0.3	Änderung des hydraulischen Widerstandes von Strömungsbarrieren durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase	C
12.1.0.4	Gaseindringdruck der Wegsamkeiten entlang Auffahrungen zwischen ELB und Nahbereich	-
12.1.0.5	Beziehung zwischen relativer Gaspermeabilität und Gassättigung von FEP 12.1	-
12.1.0.6	langfristige Beeinflussung der Permeabilität von Strömungsbarrieren durch geomechanische oder hydraulische Einwirkungen	C
12.1.0.7	langfristige Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit von mit Salz versetzten Auffahrungen durch Konvergenz	-
12.1.0.8	langfristige Desintegration von Strömungsbarrieren durch chemische Wechselwirkungen bei zementkonditioniertem Milieu	C
12.1.0.9	langfristige Desintegration von Strömungsbarrieren durch chemische Wechselwirkungen bei zementdominiertem Milieu	A
12.2	hydraulische Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen ELB und Nahbereich	A
12.2.0.1	hydraulischer Widerstand der betrachteten Schweben bzw. des betrachteten Pfeilers zwischen ELB und Nahbereich	-
12.2.0.2	Änderung des hydraulischen Widerstandes durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase	C
12.2.0.3	langfristige Änderung des hydraulischen Widerstandes von Schweben und Pfeilern durch Konvergenz	C
12.2.0.4	Gaseindringdruck der hydraulischen Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen ELB und Nahbereich	-
12.2.0.5	Beziehung zwischen relativer Gaspermeabilität und Gassättigung von FEP 12.2	-
12.3	Gasbildung durch Metallkorrosion in den ELB	A
12.3.0.1	Metallinventar in den ELB	-
12.3.0.2	Abnahme des Metallinventars während der aeroben Phase	C
12.3.0.3	Gasbildungsrate durch Metallkorrosion inkl. zeitlichem Verlauf	-
12.3.0.4	Einfluss von chemischem Milieu, Temperatur, Passivierung durch Korrosionsprodukte und Komplexbildner auf die korrosive Gasbildungsrate	-
12.4	Gasbildung durch mikrobielle Degradation von organischen Stoffen in den ELB	A
12.4.0.1	Inventar organischer Stoffe in den ELB	-
12.4.0.2	Abnahme des Inventars gasbildender organischer Stoffe während der aeroben Phase	-
12.4.0.3	Anteil des durch mikrobielle Degradation umgesetzten organischen Inventars	-
12.4.0.4	Gasbildungsrate durch mikrobielle Degradation von organischen Stoffen inkl. zeitlichem Verlauf	-
12.4.0.5	CO ₂ / CH ₄ – Verhältnis im mikrobiell gebildeten Gas	-
12.4.0.6	Einfluss von chemischem Milieu, Temperatur, Nährstoffangebot, Fluiddruck und radioaktiver Strahlung auf die mikrobielle Gasbildungsrate	-
12.5	Gasbildung durch Radiolyse in den ELB	A
12.5.0.1	Gasbildungsrate durch Radiolyse inkl. zeitlichem Verlauf	-
12.6	horizontale hydraulische Wegsamkeiten zwischen den ELK eines ELB im Fristniveau mit geringem Gaseindringdruck	A
12.7	Bildung eines Gaspolsters im ELB unter der Firste	A
12.7.0.1	Mächtigkeit des Gaspolsters im ELB unter der Firste	-
12.7.0.2	langfristige Abnahme des Gaspolsters durch Diffusion von Wasserstoff	C
12.7.0.3	langfristige Abnahme des Gaspolsters in der MAW-Kammer	C

FEP	Beschreibung	Kategorie
12.7.1	Austausch von Radionukliden zwischen Gasphase und gelöster Phase durch Lösung und Ausgasung	A
12.7.1.1	Löslichkeit radioaktiver Gasspezies	-
12.7.2	Radionuklidtransport im ELB in der Gasphase bis in das Gaspolster unter der Firste	A
12.8	Behinderung des Lösungsaustritts aus dem ELB über die Firste durch Gaspolster	A
12.9	Gasaustritt aus dem ELB in den Nahbereich	A
12.9.1	Austritt von radioaktiven Gasspezies aus dem ELB in den Nahbereich	A
12.10	Korrosion der technischen Barrieren aus Sorelbeton im MAW-Bereich durch $MgCl_2$ -untersättigte Lösung	C
12.11	Auspressen von Lösung aus dem ELB durch Konvergenz	A
12.11.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport aus dem ELB in den Nahbereich als Folge von FEP 12.11, 12.12, 12.13 und 12.14	A
12.11.1.1	Kanalisation des advektiven Radionuklidtransports aus dem ELB in den Nahbereich	-
12.11.2	diffusiver Radionuklidtransport aus dem ELB in den Nahbereich	A
12.11.3	Transport gelöster radioaktiver Gasspezies aus dem ELB in den Nahbereich	A
12.11.4	spätes Austreten von Radionukliden aus der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.34	C
12.12	Verdrängen von Lösung aus dem ELB durch Gasspeicherung im ELB	A
12.13	Lösungsaustausch zwischen ELB und Nahbereich durch allgemeine Lösungsbe- wegung im Grubengebäude	A
12.14	dichtebedingter Lösungsaustausch zwischen ELB und Nahbereich	A
12.15	Inventar von Mg-Depot (Brucit) und dessen Umsetzung im ELB	A
12.15.0.1	Viskositätsänderung des Schutzfluids durch Brucit-Zugabe (Suspension)	C
12.15.0.2	Verhältnis von Brucit-Menge und Lösungsvolumen (kammerspezifisch)	-
12.15.0.3	Verbrauch des Mg-Depots (Brucit) durch Karbonatfällung infolge CO_2 -Bildung	-
12.16	Zementinventar im ELB	A
12.16.0.1	Verhältnis von Zementmenge und Lösungsvolumen (kammerspezifisch)	-
12.17	Stützwirkung des Versatzes im ELB	A
12.17.0.1	Stützwirkung von Brucit-Granulat im ELB	-
12.17.0.2	Stützwirkung von Sorelbeton und mit Sorelmörtel injizierter Salzversatz im ELB	-
12.17.0.3	Stützwirkung der Abfallgebinde einschließlich der VBA und ihrer Korrosionsproduk- te	-
12.18	fluidzugängliches Hohlraumvolumen im ELB	A
12.18.0.1	Lösungsvolumen in Einlagerungskammern (kammerspezifisch)	-
12.19	Chemisches Milieu in den Einlagerungskammern eines ELB	A
12.19.0.1	Unterschiede der chemischen Milieus in den ELK eines ELB	-
12.19.0.2	Einwirkung der Brucit-Zugabe im Schutzfluid auf das chemische Milieu	-
12.19.0.3	Einwirkung des Brucit-Granulats auf das chemische Milieu	-
12.19.0.4	rasche Einstellung von reduzierenden Redoxbedingungen durch Metallkorrosion	-
12.19.0.5	Entwicklung zu stark reduzierenden Redoxbedingungen	C
12.19.0.6	Einwirkung der Zementkorrosion auf das chemische Milieu	-
12.19.0.7	Einwirkung der CO_2 -Bildung auf das chemische Milieu	-
12.19.0.8	Einwirkung des Lösungskontaktes mit Carnallit auf das chemische Milieu	-
12.19.0.9	Einwirkung der Nachlösung von Steinsalz auf das chemische Milieu	-

FEP	Beschreibung	Kategorie
12.19.0.10	gegenseitige Beeinflussung der chemischen Milieus von benachbarten Kammern als Folge von FEP 12.22	-
12.19.0.11	Beeinflussung des chemischen Milieus in den Einlagerungskammern durch Lösungszutritt aus dem Nahbereich	-
12.19.0.12	lokale Unterschiede des chemischen Milieus innerhalb einer ELK	C
12.19.0.13	Beeinflussung des chemischen Milieus durch Wechselwirkung mit Sorelbeton bei zementkonditioniertem Milieu	C
12.19.0.14	Beeinflussung des chemischen Milieus durch Wechselwirkung mit Sorelbeton bei zementdominiertem Milieu	A
12.20	Lösungsdichte in den Einlagerungskammern eines ELB	A
12.20.0.1	Dichteänderung durch Brucit-Zugabe (Suspension)	C
12.20.0.2	Dichteänderung durch Zementkorrosion (FEP 11.10)	-
12.20.0.3	Dichteänderung durch Wechselwirkung mit Mg-Depot (Brucit-Granulat)	-
12.21	Mischung innerhalb einer ELK	A
12.21.0.1	Verminderung der Mischung innerhalb einer ELK durch Kanalisierung	C
12.21.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport innerhalb der ELK	A
12.21.1.1	Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransports innerhalb der ELK	-
12.21.2	diffusiver Radionuklidtransport innerhalb der ELK	A
12.22	Lösungsaustausch zwischen Kammern eines ELB	A
12.22.0.1	Rate des Lösungsaustausches zwischen Kammern eines ELB	-
12.22.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport zwischen Kammern eines ELB	A
12.22.1.1	Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransports zwischen Kammern eines ELB	-
12.22.2	diffusiver Radionuklidtransport zwischen Kammern eines ELB	A
12.23	Speziation und Löslichkeit eines Radionuklids im ELB	A
12.23.0.1	Abhängigkeit der Speziation und der Löslichkeit vom chemischen Milieu	-
12.23.0.2	Abhängigkeit der Löslichkeit von nichtradioaktiven Isotopen des gleichen Elements	C
12.23.0.3	Abhängigkeit der Löslichkeit von Komplexbildnern	-
12.23.0.4	Abhängigkeit der Löslichkeit von Kolloiden	-
12.23.0.5	Abhängigkeit der Löslichkeit von der Ionenstärke	-
12.23.0.6	zeitliche Änderung der Löslichkeit infolge Änderung des chemischen Milieus	-
12.23.0.7	örtliche oder zeitliche Änderung der Löslichkeit durch Temperatur- oder Druckänderung	C
12.23.1	Ausfällung von Radionukliden außerhalb der Abfallgebinde	A
12.23.2	Lösung von Radionukliden durch zeitliche Änderung der Löslichkeit	A
12.23.3	Lösung von ausgefällten Radionukliden bei Lösungsaustausch	A
12.23.4	Ausfällung von gelösten Radionukliden bei Lösungsaustausch	A
12.24	Sorption im System Zementstein, Eisen und deren Korrosionsprodukten	A
12.24.1	Übertritt von Radionukliden in die sorbierte Phase im System Zementstein, Eisen und deren Korrosionsprodukten	A
12.24.2	Desorption von sorbierten Radionukliden bei Lösungsaustausch im ELB	A
12.25	Sorption im System Mg-Depot (Brucit-Granulat) und dessen Umsetzungsprodukten	C
12.25.1	Übertritt von Radionukliden in die sorbierte Phase im System Mg-Depot (Brucit-Granulat) und dessen Umsetzungsprodukten	C
12.26	deutlich reduzierte Radionuklid-Rückhaltung durch Löslichkeit und Sorption wegen erheblich abweichendem chemischem Milieu gegenüber der Szenariengruppe des Referenzszenarios (ELB-spezifisch)	B _N

FEP	Beschreibung	Kategorie
12.27	nukleare Kritikalität	C
12.28	Kontaktfläche zwischen Lösung und Sorelbeton in der MAW-Kammer	A
12.29	Behinderung des Eindringens von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer durch eingeschlossene Grubenluft ab der frühen Nachbetriebsphase	B _N
12.30	hydraulische Wegsamkeit von der MAW-Kammer in der aufgelockerten Sohle und entlang der Auflockerungszone des Durchhiebs in die Kammer 8/511	B _N
12.30.0.1	hydraulische Leitfähigkeit des Pfades FEP 12.30	-
12.31	Korrosion von Sorelbeton in der MAW-Kammer durch zementbeeinflusste Lösung	A
12.31.0.1	mittlere Tiefe der Korrosion von Sorelbeton als Folge von FEP 12.31	-
12.31.0.2	Bildung von neuem Porenvolumen in der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.31	-
12.32	Sorption im System Sorelbeton, Brucit-Granulat und dessen Umsetzungsprodukten in der MAW-Kammer	C
12.32.1	Übertritt von Radionukliden in die sorbierte Phase im System Sorelbeton, Brucit-Granulat und dessen Umsetzungsprodukten in der MAW-Kammer	C
12.33	Bildung eines durchgehenden Risses im Sorelbeton in der MAW-Kammer	C
12.34	Erneutes Vordringen von Lösung in die MAW-Kammer nach dem Verdrängen von Lösung durch Gasbildung in der mittleren Nachbetriebsphase	C
	Kompartiment 13: Nahbereich der ELB	
13.1	hydraulische Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen Nahbereich und Kompartiment 14	A
13.1.0.1	hydraulischer Widerstand der betrachteten Schweben bzw. des betrachteten Pfeilers zwischen Nahbereich und Kompartiment 14	-
13.1.0.2	Änderung des hydraulischen Widerstandes durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase	C
13.1.0.3	Gaseindringdruck von Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen Nahbereich und Kompartiment 14	-
13.1.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport vom Nahfeld in das Kompartiment 14 entlang den Wegsamkeiten von FEP 13.1 und 13.9	A
13.1.2	diffusiver Radionuklidtransport vom Nahfeld in das Kompartiment 14 entlang den Wegsamkeiten von FEP 13.1 und 13.9	A
13.2	Auflockerungszone in der Firste des Carnallit-Baufeldes	A
13.2.0.1	Permeabilität und wirksamer Querschnitt der Auflockerungszone FEP 13.2	-
13.3	Gasbildung im Nahbereich der ELB	A
13.3.0.1	Inventar gasbildender Stoffe im Nahbereich der ELB	-
13.3.0.2	Gasbildungsrate im Nahbereich	-
13.4	Lösungsbewegung im Nahbereich aufgrund von Konvergenz und Gasspeicherung	A
13.4.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport im Nahbereich als Folge von FEP 13.4, 13.5 und 13.6	A
13.4.1.1	Kanalisation des advektiv/dispersiven Radionuklidtransports im Nahbereich	-
13.4.1.2	Transportverzögerung durch Diffusion in nicht durchströmte Porenvolumina	-
13.4.1.3	Transportverzögerung durch Dichteschichtung im MAW-Nahbereich (FEP 13.18)	-
13.5	kammerübergreifende dichtebedingte Lösungsbewegung in den Grubenbauen des Älteren und Jüngeren Steinsalz (ohne FEP 12.14)	C
13.6	dichtebedingte Lösungsbewegung im Carnallit-Baufeld	C
13.7	Anstieg der Lösungsdichte im Carnallit-Baufeld als Folge von FEP 10.21	C
13.8	verminderte Mischung der Lösung im MAW-Nahbereich aufgrund von Dichteschichtung (FEP 13.18)	A

FEP	Beschreibung	Kategorie
13.8.0.1	Grad der Vermischung	-
13.8.0.2	wirksames Mischvolumen im MAW-Nahbereich	-
13.9	hydraulische Wegsamkeiten zwischen Nahbereich und Kompartiment 14 entlang Auffahrungen	A
13.9.0.1	hydraulischer Widerstand von Strömungsbarrieren in Wegsamkeiten FEP 13.9	-
13.9.0.2	hydraulische Leitfähigkeit von Wegsamkeiten ohne Strömungsbarrieren	-
13.9.0.3	Gaseindringdruck der Wegsamkeiten entlang Auffahrungen zwischen Nahfeld und Kompartiment 14	-
13.9.0.4	langfristige Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit von Wegsamkeiten ohne Strömungsbarriere durch Konvergenz	-
13.9.0.5	langfristige Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit von Drainagen durch Einkriechen von Salz und Rekristallisation	C
13.10	Mischung von zementbeeinflusster Lösung aus ELB mit „R-Lösung“	A
13.10.0.1	Anstieg der Dichte der zementbeeinflussten Lösung aus ELB als Folge von FEP 13.10 und 13.11	-
13.10.1	Verminderung der Radionuklidkonzentration durch Mischung mit radionuklidfreier Lösung FEP 13.10	A
13.10.2	diffusiver Radionuklidtransport im Nahbereich	A
13.10.3	Austausch von Radionukliden zwischen Gasphase und gelöster Phase im Nahbereich durch Lösung und Ausgasung	A
13.11	Mineralausfällungen als Folge von FEP 13.10	C
13.11.1	Ausfällung von Radionukliden bei der Mischung von zementbeeinflusster Lösung mit „R-Lösung“	C
13.12	Umlösung am Carnallit durch zementbeeinflusste Lösung	A
13.12.0.1	Änderung der Lösungsdichte als Folge von FEP 13.12	-
13.12.0.2	Bildung von zusätzlichem Porenvolumen im Nahbereich als Folge von FEP 13.12	C
13.13	chemisches Milieu im Nahbereich der ELB	C
13.13.1	Ausfällung gelöster und Lösung ausgefällter Radionuklide als Folge des unterschiedlichen chemischen Milieus im Nahbereich und im ELB	C
13.14	Ausgasen von Lösung aus den ELB beim Übertritt in höher gelegene Grubenbaue des Nahbereichs	C
13.15	Sorption an Sorelbeton und -mörtel sowie Salzversatz im Nahbereich	C
13.16	Bildung einer mobilen Gasphase im Nahbereich	A
13.16.1	Transport radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im Nahbereich	A
13.17	Sorption am Zementstein und dessen Korrosionsprodukten im Nahbereich der MAW-Kammer	C
13.17.1	Übertritt von Radionukliden in die sorbierte Phase am Zementstein oder an dessen Korrosionsprodukten im Nahbereich der MAW-Kammer	C
13.18	Dichteschichtung im MAW-Nahbereich	A
13.18.0.1	Mächtigkeit der zementkonditionierten Lösung im Firstbereich	-
	Kompartiment 14: Übriges Grubengebäude	
14.1	hydraulische Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler im Kompartiment 14	A
14.1.0.1	hydraulischer Widerstand der betrachteten Schweben bzw. des betrachteten Pfeilers im Kompartiment 14	-
14.1.0.2	Permeabilität des Salzversatzes in den Abbauen des Baufeldes in der Südflanke	-
14.2	Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke	A
14.2.0.1	Permeabilität und wirksamer Querschnitt der Auflockerungszone FEP 14.2	-

FEP	Beschreibung	Kategorie
14.2.0.2	Einfluss der Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase auf die Auflockerungszone FEP 14.2	-
14.2.0.3	Fliessporosität der Auflockerungszone FEP 14.2	-
14.3	Gasbildung in den übrigen Grubenbauen	A
14.3.0.1	Inventar gasbildender Stoffe in den übrigen Grubenbauen	-
14.3.0.2	Gasbildungsrate in den übrigen Grubenbauen	-
14.4	Lösungsbewegung im Baufeld in der Südflanke aufgrund von Konvergenz und Gasspeicherung	A
14.4.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport im Baufeld in der Südflanke	A
14.4.1.1	großräumige Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransports im Baufeld in der Südflanke	-
14.4.1.2	kleinräumige Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransports im Baufeld in der Südflanke	-
14.4.1.3	Transportverzögerung durch Diffusion in nicht durchströmte Porenvolumina	-
14.4.2	diffusiver Radionuklidtransport im Baufeld in der Südflanke	A
14.5	Kanalisierung der Lösungsbewegung im Baufeld in der Südflanke	A
14.5.0.1	Grad der Kanalisierung der Lösungsbewegung im Baufeld in der Südflanke	-
14.6	Lösungsbewegung entlang der Auflockerungszone FEP 14.2 aufgrund von Konvergenz und Gasspeicherung in der Grube	A
14.6.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport in der Auflockerungszone am Südstoß (FEP 14.2)	A
14.6.1.1	Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransportes in der Auflockerungszone am Südstoß	-
14.7	dichtebedingte Lösungsbewegung im Baufeld in der Südflanke und in der Auflockerungszone am Südstoß	C
14.8	Mischung von radionuklidhaltiger Lösung mit radionuklidfreier Lösung	A
14.8.1	Verminderung der Radionuklidkonzentration durch Mischung mit radionuklidfreier Lösung und durch Diffusion	A
14.8.2	Ausfällung von Radionukliden beim Mischen von Grubenlösung und Deckgebirgslösung in der Grube als Folge von FEP 10.11	C
14.8.3	Verminderung der Radionuklidkonzentration beim Mischen von Grubenlösung und Deckgebirgslösung in der Grube als Folge von FEP 10.11 und 14.8.2	A
14.9	Chemische Zusammensetzung der aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge austretenden Lösung	A
14.9.0.1	Dichte der aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge austretenden Lösung	-
14.10	Sorption am Salzversatz und Salzgestein im Baufeld in der Südflanke	C
14.11	Bildung einer mobilen Gasphase im Baufeld in der Südflanke	A
14.11.1	Transport radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im Baufeld in der Südflanke	A
14.11.2	Speicherung radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im Baufeld in der Südflanke	A
14.11.3	Austausch von Radionukliden zwischen Gasphase und gelöster Phase im Baufeld in der Südflanke durch Lösung und Ausgasung	A
	Kompartiment 15: Wirtsgestein	
15.1	Aufbau des Wirtsgesteins	A
15.2	Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke	A
15.2.0.1	Größe der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke	-
15.2.0.2	Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase	B

FEP	Beschreibung	Kategorie
15.3	Spannungszustand im Wirtsgestein	A
15.3.0.1	Änderung des Spannungszustands im Wirtsgestein durch fortschreitende Konvergenz des Grubengebäudes bei Umsetzen der Schließungsmaßnahmen	-
15.3.0.2	Ansteigen der Gebirgsspannung im Wirtsgestein während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort	B
15.4	Subrosion des Wirtsgesteins	A
15.4.0.1	Subrosionsrate am Salzspiegel	-
15.4.0.2	Subrosionsrate an der SW-Flanke der Salzstruktur im Bereich des Grubengebäudes	-
15.4.0.3	erhöhte Subrosionsrate bei Eisüberlagerung	B
15.5	Salzkinetik (inkl. Halokinese)	A
15.5.0.1	Rate der differentiellen Hebung/Senkung des Grubengebäudes unter heutigen Bedingungen	-
15.5.0.2	Verstärkung der Salzkinetik durch Gletscherauflast	C
15.5.0.3	Verstärkung der Salzkinetik durch erhöhte Sedimentauflast	C
15.6	hydraulische Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2) im Teufenbereich 500 m bis 574 m	A
15.6.0.1	Orte der Wegsamkeiten FEP 15.6	-
15.6.0.2	hydraulische Leitfähigkeit der Wegsamkeiten FEP 15.6	-
15.6.0.3	Erhöhung der Leitfähigkeit durch Lösungsprozesse	C
15.6.0.4	strömungswirksamer Querschnitt der Wegsamkeiten FEP 15.6	-
15.6.0.5	Eigenschaften der Wegsamkeiten FEP 15.6 für 2-Phasen-Fluss	C
15.6.0.6	Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit durch die verminderte Lösungssättigung bei Gasaustritt entlang FEP 15.6 als Folge von FEP 15.11	C
15.7	Austritt von Lösung aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6	A
15.7.0.1	Reaktivierung des Lösungsaustritts entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23	B
15.7.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6	A
15.7.1.1	Reaktivierung des Radionuklidtransports entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23	B
15.7.2	diffusiver Radionuklidtransport aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6	A
15.8	Verschlüsse der Tagesschächte	A
15.8.0.1	integraler hydraulischer Widerstand der Verschlüsse der Tagesschächte	-
15.8.0.2	Gaseindringdruck der Schachtverschlüsse einschließlich der angrenzenden Auflockerungszone	-
15.8.0.3	erhöhte Permeabilität der Schachtverschlüsse durch Wechselwirkung mit MgCl ₂ -untersättigter Lösung FEP 15.12	C
15.8.0.4	Gassättigung der Schachtverschlüsse einschließlich der angrenzenden Auflockerungszone zu Beginn der Nachbetriebsphase	-
15.9	Austritt von Lösung aus der Grube in das Hutgestein entlang FEP 15.8	C
15.9.1	Transport gelöster Radionuklide entlang FEP 15.8	C
15.10	erheblicher Gasaustritt aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte	B
15.10.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte als Folge von FEP 15.10	B

FEP	Beschreibung	Kategorie
15.10.2	Übertritt von Radionukliden aus der Gasphase in Lösung beim Aufstieg entlang der Tagesschächte oberhalb der Schachtverschlüsse	C
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6	B
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6	B
15.11.2	Speicherung radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im aufgelockerten Steinsalz in der Südflanke	C
15.12	langzeitige Korrosion der Schachtverschlüsse durch MgCl ₂ -untersättigte Lösung im Grubenhöchsten	C
15.13	mechanische Desintegration der Schachtverschlüsse	C
15.14	hydraulische Wegsamkeiten und Lösungsfluss entlang Bohrung mit unwirksamer Verfüllung und entlang der Anhydritmittel bzw. Pegmatitanhydrit zum Salzspiegel	C
15.15	Wegsamkeiten durch unentdeckte geologische Strukturen	C
15.16	Entstehen von Wegsamkeiten im Kaliflöz Staßfurt durch Umlöseprozesse	C
15.17	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss entlang der Tiefbohrung R1	C
15.18	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss entlang Bohrung in die Nordflanke mit unwirksamer Verfüllung, anschließend entlang der Anhydritmittel bzw. des Pegmatitanhydrit und dann entlang einer der Tiefbohrungen R1, R2 oder R3	C
15.19	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss von der Grube in den so1A der Südflanke entlang einer der drei verfüllten Bohrungen auf der 775-m- bzw. 750-m-Sohle	C
15.20	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss von der Grube in den so1A entlang der mit einer Strömungsbarriere versehenen Strecke aus der Kammer 3/750 nach Süden	C
15.21	Entstehung einer hydraulischen Wegsamkeit von der 595-m-Sohle zum Rötanhydrit nach mehreren 10'000 Jahren durch Subrosion an der Südflanke	C
15.22	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Bildung von Klüften im Wirtsgestein im Zusammenhang mit Permafrost nach rund 100'000 Jahren	B
15.22.1	Radionuklidtransport entlang FEP 15.22 oder FEP 15.23 nach 100'000 Jahren oder mehr bei Vereisung des Standortes	B
15.23	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Absinken des Salzspiegels nach mehreren 100'000 Jahren	B
15.24	Sorption am Salzgestein während des Transportes durch die Steinsalz-Barriere	C
15.25	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss entlang der Anhydritmittel vom Salzspiegel westlich Schacht 4 bis zum Kontakt mit dem Rötanhydrit in der Südflanke	A
15.25.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit FEP 15.25	-
15.25.1	Hochpressen eines mit FEP 22.5.3 vergleichbaren Anteils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang der Anhydritmittel bis ins Kompartiment 21	A
15.26	hydraulischer Kontakt zwischen den Anhydritmitteln und der Auflockerungszone des Grubengebäudes	C
	Teilsystem 2 „Hutgestein und Deckgebirge“	
	Übergeordnete FEP	
20.1	Aufbau von Deckgebirge und Hutgestein	A
20.1.0.1	Erhöhung der Sedimentüberdeckung	C
20.1.0.2	erosive Verringerung der Sedimentüberdeckung durch epirogenetische Hebung	C
20.2	Auflockerungszone im Deckgebirge (SW-Flanke) bezüglich gebirgsmechanischer Verhältnisse	A

FEP	Beschreibung	Kategorie
20.2.0.1	Ausdehnung der Auflockerungszone im Deckgebirge	-
20.2.0.2	Anwachsen der Auflockerungszone im Deckgebirge bis Ende der frühen Nachbetriebsphase	C
20.2.0.3	subrosionsbedingte Vergrößerung der Auflockerungszone	B _G
20.3	Spannungszustand im Deckgebirge (Gewölbewirkung)	A
20.3.0.1	Abnahme der effektiven Gebirgsspannung im Deckgebirge in der Flanke des Grubengebäudes durch ansteigenden Fluiddruck ab Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks und ausgeprägter ab Beginn Nachbetriebsphase	-
20.3.0.2	Zunahme der Gebirgsspannung und Abnahme der Hauptspannungsdifferenzen im Deckgebirge an der Flanke des Grubengebäudes durch ansteigende Stützwirkung des Versatzes in der Grube	-
20.3.0.3	Änderung des Spannungszustandes, glazial bedingt	B _G
20.4	Störungen im Deckgebirge	A
20.4.0.1	Lage der Störungen im Deckgebirge	-
20.4.0.2	Bildung von Störungen durch fortschreitenden Versturz des Deckgebirges	C
20.4.0.3	Bildung von Störungen durch Gletscherauflast	C
20.5	hydraulische Randbedingung im Rötanhydrit in der Südflanke (Ort von FEP 15.6)	A
20.5.0.1	hydraulischer Druck am Ort von FEP 15.6 zu Beginn des Schutzfluid-Einleitens auf der 750-m-Sohle	-
20.5.0.2	hydraulischer Druck in der mittleren und späten Nachbetriebsphase am Ort von FEP 15.6 (zeitabhängig)	-
20.5.0.3	vertikaler Druckgradient im Rötanhydrit in der Südflanke (Ort von FEP 15.6)	-
20.5.0.4	integraler hydraulischer Widerstand des Deckgebirges gegen Lösungsauspressung aus der Grube entlang FEP 15.6	-
20.5.0.5	langfristige Abnahme des hydraulischen Drucks durch Verminderung des Oberflächenreliefs	-
20.5.0.6	erhöhter hydraulischer Druck während einer Vereisung des Standortes	B
20.6	Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung im Wirtsgestein und im Deckgebirge	A
20.6.0.1	Änderung der Dichte der aus dem Grubengebäude austretenden Lösung durch Mischung mit Deckgebirgslösung und Mineralausfällungen	-
20.6.1	Verminderung der Radionuklidkonzentration bei der Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung	A
20.6.2	Ausfällung von Radionukliden bei der Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung	C
20.7	natürliche Grundwasserbewegung im Deckgebirge und Hutgestein	A
20.7.0.1	hydraulische Druckdifferenz zwischen dem Muschelkalk in der Südflanke einerseits und dem gut durchlässigen Bereich des Kompartiments 21 andererseits	-
20.7.0.2	Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze im Deckgebirge/Hutgestein	-
20.7.0.3	Entwässerung des Gletschers über eine Senke über dem verstürzten Deckgebirge in eine subglaziale Rinne in der Okertalung bei Vergletscherung des Standortes	B _G
20.7.0.4	Entwässerung des Gletschers zum Gletscherrand	C
20.7.1	Ausbreitung der kontaminierten Lösung im Deckgebirge/Hutgestein mit Dichteeinwirkung	A
20.7.1.1	Änderung der Dichte der kontaminierten Lösung während der Ausbreitung im Deckgebirge/Hutgestein durch Mischung mit unbeeinflusstem Porenwasser	-
20.7.1.2	lokale Erhöhung der Porenwasserdichte im Deckgebirge durch das Auspressen von unkontaminiertem Schutzfluid vor dem Austreten von Radionukliden	A
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)	B

FEP	Beschreibung	Kategorie
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts	-
20.9	klimatische Entwicklung mit Vereisung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“)	B
20.9.0.1	Mächtigkeit des Gletschers	-
20.9.0.2	erhöhte Auspressrate von Lösung aus dem Grubengebäude während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort	-
20.10	andere Klimaentwicklungen	C
20.11	Meeresspiegelschwankung	C
20.12	Glazialisostasie	C
20.13	Meteoriteneinschlag	C
20.14	Oberflächenrelief	A
20.14.0.1	Veränderungen des Oberflächenreliefs	-
20.15	regionale Hebung	A
20.15.0.1	Rate der regionalen Hebung	-
20.16	regionale Erosion (Denudation)	A
20.16.0.1	Rate der regionalen Erosion (Denudation)	-
20.17	differentielle Erosion der Infiltrationszonen auf dem Asse Höhenzug	A
20.17.0.1	Rate der differentiellen Erosion	-
20.18	glaziale Erosion und fluviatile Sedimentation nach Gletscherrückzug	C
20.19	Epirogenetische Beckenbildung (Geosynklinalentwicklung) mit Transgression	C
20.20	Epirogenetische Hebung (Geantiklinalentwicklung)	C
20.21	Orogenese	C
20.22	Gesteinsmetamorphose	C
20.23	magmatische Aktivität und Vulkanismus	C
20.24	seismische Aktivität	C
20.25	Magnetfeldänderungen	C
20.26	Entstehung einer an Lösung ungesättigten Zone im Deckgebirge nahe der Übertrittsstelle FEP 15.6 durch das Austreten von Druckluft in der Betriebsphase (FEP 10.33)	A
20.26.0.1	Ausdehnung des an Lösung ungesättigten Deckgebirgsbereichs nahe des Orts von FEP 15.6	-
20.26.0.2	Fluiddruck nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks und während der frühen Nachbetriebsphase am Ort von FEP 15.6 (zeitabhängig)	-
	Kompartiment 21: Hutgestein und verstürztes Deckgebirge	
21.1	Aufbau von verstürztem Deckgebirge und Hutgestein	A
21.2	Grundwasserfluss im Kompartiment 21	A
21.2.0.1	hydraulische Durchlässigkeit des verstürzten Deckgebirges NW der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg	-
21.2.0.2	hydraulischer Kontakt zwischen dem Rötanhydrit und dem Kompartiment 21	-
21.2.0.3	langzeitige Abnahme der Höhendifferenz zwischen der Infiltrationszone auf dem Asse Höhenzug und der Exfiltrationszone bei Groß Denkte	-
21.2.0.4	hydraulische Durchlässigkeit des verstürzten Deckgebirges im Vahlberger Abschnitt	-
21.2.0.5	erhöhter Grundwasserfluss im Kompartiment 21 bei Vergletscherung	B _G
21.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung in strukturparalleler Richtung gegen Groß Denkte	B _G
21.2.1.1	Sorption im verstürzten Deckgebirge im Bereich der Subrosionsgerinne	C

FEP	Beschreibung	Kategorie
21.2.2	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung zwischen der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) und dem Bereich Gr. Vahlberg	B _G
21.2.2.1	Sorption im verstürzten Deckgebirge SE der Subrosionsgerinne	-
21.2.3	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte	B _G
21.2.3.1	Sorption zwischen der Basis des Kompartiments 21 und der Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte	-
21.2.4	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Bereich des Geländeeinschnittes entlang der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg	A
21.2.5	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in Kompartiment 21 Richtung SE südöstlich des Vahlberger Abschnitts	C
21.3	Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE durch fortschreitende Subrosion	B _G
21.4	unterirdische Wasserscheide der Grundwasserzirkulation im Kompartiment 21 bezüglich NW-SE-licher Fließrichtung	A
21.4.0.1	Ort der unterirdischen Grundwasserscheide	-
21.4.0.2	Verlagerung der unterirdischen Grundwasserscheide gegen SE gekoppelt an FEP 21.3	B _G
21.5	Vermischung der Lösung mit unkontaminierten Salzwässern im Kompartiment 21	A
21.5.0.1	Verdünnungsrate bis Groß Denkte (Basis Kompartiment 21)	-
21.5.0.2	Verdünnungsrate im Raum Groß Denkte von der Basis des Kompartiments 21 bis zur Geländeoberfläche	-
21.5.0.3	Verdünnungsrate bis zu den Störungen Ammerbeek und Groß Vahlberg	-
21.5.0.4	Verdünnungsrate im Bereich des Geländeeinschnittes entlang der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg von der Basis des Kompartiments 21 bis zur Geländeoberfläche	-
21.6	hydraulischer Kontakt zwischen Subrosionsgerinnen und Querstörungen an SW-Flanke	C
21.7	fortschreitender Versturz des Deckgebirges über dem Salzspiegel	A
21.7.0.1	Versturzrate des Deckgebirges	-
21.8	hydraulischer Kontakt zwischen dem verstürzten Deckgebirge und dem Muschelkalk der NE-Flanke im Vahlberger Abschnitt	A
	Kompartiment 22: Rötanhydrit (so1A) der SW-Flanke	
22.1	bergbaubedingte Auflockerungszone im Rötanhydrit so1A in der SW-Flanke	A
22.1.0.1	Größe der bergbaubedingten Auflockerungszone im so1A	-
22.1.0.2	bergbaubedingtes Anwachsen der Auflockerungszone im so1A	C
22.1.0.3	erhöhte Permeabilität des bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit so1A	-
22.1.0.4	Kluft- und zugängliche Matrixporosität des bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit so1A	-
22.2	Folgen der geogenen Beanspruchung im Rötanhydrit	A
22.2.0.1	hydraulische Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit	-
22.2.0.2	Ansteigen der hydraulischen Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit durch Verkarstung (Bezug zu FEP 22.3.0.1)	-
22.2.0.3	Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit durch Vergipsung (Bezug zu FEP 22.4)	C
22.3	Verkarstung des Rötanhydrit	A
22.3.0.1	Fortschreiten der Verkarstung bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase	-

FEP	Beschreibung	Kategorie
22.4	Vergipsung des Rötanhydrit	C
22.5	Grundwasserfluss im Rötanhydrit	A
22.5.0.1	Änderung des hydraulischen Gradienten im Rötanhydrit durch das Auspressen von Grubenlösung	-
22.5.0.2	Unterbruch des schichtparallelen Grundwasserflusses im Rötanhydrit durch Versatz an Störungen	-
22.5.1	schichtparalleler Transport im Rötanhydrit im Bereich der bergbaubedingten Auflockerung mit Dichteeinwirkung	A
22.5.1.1	Sorption im bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit	-
22.5.2	schichtparalleler Transport im geogen beanspruchten Rötanhydrit mit Dichteeinwirkung (bis zu den Einschnitten Wittmar und Ammerbeek)	A
22.5.2.1	Sorption im Rötanhydrit außerhalb des bergbaubedingt aufgelockerten Bereiches	-
22.5.3	Hochpressen des größten Teils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit bis ins Kompartiment 21	B _G
22.5.4	weitreichender schichtparalleler Transport im Rötanhydrit mit Dichteeinwirkung (W Einschnitt Wittmar bzw. E Einschnitt Ammerbeek)	C
22.6	Vermischung mit unkontaminiertem Porenwasser im Rötanhydrit	A
22.6.0.1	Verdünnungsrate im Rötanhydrit.	-
	Kompartiment 23: Rötaquitard (so2-so4) der SW-Flanke	
23.1	bergbaubedingte Auflockerungszone im Rötaquitard so2-so4 in der SW-Flanke, speziell Scherdeformationsbereich S3/D9	A
23.1.0.1	Größe der bergbaubedingten Auflockerungszone des Rötaquitards	-
23.1.0.2	bergbaubedingtes Anwachsen der Auflockerungszone im Rötaquitard	C
23.1.0.3	Permeabilität der bergbaubedingten Auflockerungszone im Rötaquitard	-
23.1.0.4	Ansteigen der Permeabilität der bergbaubedingten Auflockerungszone im Rötaquitard in der Betriebs- oder frühen Nachbetriebsphase	C
23.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Radionuklidtransport durch den bergbaubedingt aufgelockerten Rötaquitard so2-so4 mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße	B _G
23.1.1.1	Sorption im Rötaquitard	-
23.2	schichtquerende Störungen im Rötaquitard mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit	B _G
23.2.0.1	Verlauf der Störungen im Rötaquitard	-
23.2.0.2	Transmissivität der Störungen im Rötaquitard	-
23.2.1	Transport entlang schichtquerender Störungen im Rötaquitard mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße	B _G
	Kompartiment 24: Muschelkalkaquifer der SW-Flanke	
24.1	Grundwasserfluss im Muschelkalkaquifer	A
24.1.0.1	Exfiltrations- und Infiltrationsverhältnisse im Bereich der Störungen von Wittmar und Ammerbeek	-
24.1.1	schichtquerender Transport im Muschelkalkaquifer entlang Störungszonen mit Dichteeinwirkung	A
24.1.1.1	Sorption im Muschelkalkaquifer	-
24.1.2	schichtparalleler advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Muschelkalk mit Einfluss von Dichteeffekten	A
24.1.3	Matrixdiffusion bei advektiv/dispersivem Transport im Muschelkalk	A
24.2	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Muschelkalkaquifer	A
24.2.0.1	Verdünnungsrate im Muschelkalkaquifer	-

FEP	Beschreibung	Kategorie
	Kompartiment 25: Deckgebirge im stratigraphisch Hangenden des Muschelkalk in der SW-Flanke	
25.1	Wegsamkeiten im Kompartiment 25 (vorwiegend entlang Störungszonen)	B _G
25.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Kompartiment 25 mit Dichteeinwirkung	B _G
25.1.1.1	Sorption im Kompartiment 25	-
	Kompartiment 26: Geringleiter des Unteren Buntsandstein (su) in der NE-Flanke	
26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg	B _G
26.1.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg	-
26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung	B _G
26.1.1.1	Sorption im Unteren Buntsandstein	-
	Kompartiment 27: Aquifer des Unteren Buntsandstein (su-p) in der NE-Flanke	
27.1	Grundwasserfluss im Rogenstein	A
27.1.0.1	Exfiltrations- und Infiltrationsverhältnisse im Bereich der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg	-
27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung	B _G
27.2	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Rogenstein	A
27.2.0.1	Verdünnungsrate im Rogenstein	-
	Kompartiment 28: Deckgebirge im stratigraphisch Hangenden des Rogenstein (su-p) in der NE-Flanke	
28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg	B _G
28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung	B _G
28.2	Wegsamkeiten und Grundwasserfluss aus dem Vahlberger Abschnitt des verstürzten Deckgebirges über hydraulisch wirksame Kontakte direkt in den Muschelkalk der NE-Flanke	A
28.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang FEP 28.2 mit Dichteeinwirkung	A
28.3	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Hangenden des Rogenstein	A
28.3.0.1	Verdünnungsrate im Hangenden des Rogenstein	-
	Kompartiment 29: Oberflächennahe Grundwasserleiter	
29.1	Grundwasserfluss und Grundwasserumsatz im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger	A
29.1.0.1	Veränderung von Grundwasserfluss und -umsatz durch Änderung des Oberflächenreliefs	-
29.1.0.2	Veränderung von Grundwasserfluss und -umsatz durch Klimaänderung (ohne Vergletscherung)	C
29.1.0.3	Erhöhter Grundwasserumsatz im oberflächennahen Grundwasserleiter bei Vergletscherung	C
29.1.1	Freisetzung von Radionukliden in den oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger	A

FEP	Beschreibung	Kategorie
29.2	Verdünnung im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger	A
29.2.0.1	Verdünnungsrate im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger	-
29.3	Quartärrinnen entlang von Quer- und Diagonalstörungen	A
29.3.0.1	Tiefenerstreckung der Quartärrinnen	-
29.3.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang von Quartärrinnen	A

Exemplar für BMBF und BMU

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G	Referenzszenario		Szenario acM		Szenario LsgMAW		Szenario vZdSB		Szenario GTs		Szenario Vg	
		ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
15.7.1.1	Reaktivierung des Radionuklidtransports entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23		x		x		x		x		x	x	
15.10	erheblicher Gasaustritt aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte		x		x		x		x	x			x
15.10.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte als Folge von FEP 15.10		x		x		x		x	x			x
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6	x		x		x		x			x	x	
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6	x		x		x		x			x	x	
15.22	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstückte Deckgebirge durch Bildung von Klüften im Wirtsgestein im Zusammenhang mit Permafrost nach rund 100'000 Jahren		x		x		x		x		x	x	
15.22.1	Radionuklidtransport entlang FEP 15.22 oder FEP 15.23 nach 100'000 Jahren oder mehr bei Vereisung des Standortes		x		x		x		x		x	x	
15.23	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstückte Deckgebirge durch Absinken des Salzspiegels nach mehreren 100'000 Jahren		x		x		x		x		x	x	
20.5.0.6	erhöhter hydraulischer Druck im Rötanhydrit am Ort von FEP 15.6 während einer Vereisung des Standortes		x		x		x		x		x	x	
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)	x		x		x		x		x			x
20.9	klimatische Entwicklung mit Vereisung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“)		x		x		x		x		x	x	

Exemplar für BMBF und BMU

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _N	Referenzszenario		Szenario vD-W		Szenario vD-E		Szenario vZdSB		Szenario GTs		Szenario Vg	
		ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
21.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung in strukturparalleler Richtung gegen Groß Denkte		x	x			x		x		x		
21.2.2	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung zwischen der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) und dem Bereich Gr. Vahlberg	x			x	x		x		x			x
21.2.3	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte		x	x			x		x		x		
21.3	Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE durch fortschreitende Subrosion		x	x			x		x		x		
21.4.0.2	Verlagerung der unterirdischen Grundwasserscheide gegen SE gekoppelt an FEP 21.3		x	x			x		x		x		
22.5.3	Hochpressen des größten Teils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit bis ins Kompartiment 21		x	x		x			x		x		
23.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Radionuklidtransport durch den bergbaubedingt aufgelockerten Röttaquitard so ₂ -so ₄ mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße	x			x		x		x		x		
23.2	schichtquerende Störungen im Röttaquitard mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit	x			x		x		x		x		
23.2.1	Transport entlang schichtquerender Störungen im Röttaquitard mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße	x			x		x		x		x		
25.1	Wegsamkeiten im Kompartiment 25 (vorwiegend entlang Störungszonen)	x			x		x		x		x		
25.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Kompartiment 25 mit Dichteeinwirkung	x			x		x		x		x		
26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg	x			x	x			x		x		
26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung	x			x	x			x		x		
27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung	x			x	x			x		x		
28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg	x			x	x			x		x		
28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung	x			x	x			x		x		

Anhang C.1: Vollständige Liste der FEP der Klasse A

	FEP der Klasse A
	Teilsystem 1: „Nahfeld“
	Übergeordnete FEP
10.1	Geometrie des Grubengebäudes
10.1.0.1	Änderungen der Grubengeometrie durch Konvergenz
10.2	Spannungszustand im Wirtsgestein und im Tragsystem Grubengebäude
10.2.0.2	langfristige Zunahme des Gebirgsdrucks und Abnahme von Hauptspannungsdifferenzen im Grubengebäude durch Konvergenz und zunehmende Kompaktion des Salzversatzes
10.3	Tragfähigkeit des Tragsystems Grubengebäude
10.3.0.1	durchfeuchteter Anteil des Salzgesteins mit verminderter Tragfähigkeit
10.3.0.2	Charakteristik der Tragfähigkeit von durchfeuchtetem Salzgestein
10.3.0.3	Charakteristik der Tragfähigkeit von Salzversatz
10.3.0.4	Verminderung der Tragfähigkeit durch Verformung des Tragsystems
10.3.0.7	langfristige Zunahme der Tragfähigkeit durch wachsende Kompaktion des Salzversatzes
10.4	Lösungszutritt aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude
10.4.0.1	Rate des Lösungszutritts aus dem Deckgebirge
10.4.0.2	NaCl-Sättigung der Lösung aus dem Deckgebirge beim Eintritt in die Wegsamkeit FEP 15.6
10.4.0.3	MgCl ₂ - und MgSO ₄ -Konzentration der Lösung aus dem Deckgebirge beim Eintritt in die Wegsamkeit FEP 15.6
10.4.0.4	Rückgang des Lösungszutritts aus dem Deckgebirge nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks (FEP 10.33) und während des Einleitens von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke
10.5	Einleiten von Schutzfluid in das Grubengebäude
10.5.0.1	Schutzfluid-Einletrate
10.5.0.2	chemische Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids beim Einleiten
10.5.0.3	chemische Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids bei Gebirgstemperatur
10.6	Konvergenz des Grubengebäudes
10.6.0.1	Erhöhte Konvergenzrate durch Feuchtekiechen nach Einleiten des Schutzfluids
10.6.0.2	Verringerung der Konvergenzrate durch den Fluiddruck
10.6.0.3	Rate der Trockenkonvergenz
10.6.0.4	Konvergenzrate während der mittleren und späten Nachbetriebsphase
10.6.0.5	örtliche Variabilität der Konvergenzrate aufgrund von unterschiedlichen Spannungsverhältnissen und Gesteinseigenschaften
10.6.0.6	örtliche und zeitliche Variabilität der Konvergenzrate durch hydraulische Änderungen des Fluiddrucks
10.7	Porosität des Salzversatzes (ortsabhängig)
10.7.0.1	Abnahme der Porosität des Salzversatzes durch Konvergenz während des Einleitens von Schutzfluid (Feuchtekiechen)
10.7.0.2	Abnahme der Porosität des Salzversatzes durch Konvergenz in der Nachbetriebsphase
10.8	Nachsacken des Salzversatzes beim Einleiten des Schutzfluids
10.8.0.1	Verminderung der Permeabilität der Versatzkörper durch Nachsacken beim Einleiten des Schutzfluids
10.8.0.2	erhöhte Leitfähigkeit von Firstspalten

	FEP der Klasse A
10.9	Stützwirkung des Schutzfluids
10.9.0.1	Druck des Schutzfluids (ortsabhängig)
10.9.0.2	Anstieg des Fluiddrucks im Grubengebäude während der frühen Nachbetriebsphase
10.9.0.3	örtlich unterschiedlicher hydraulischer Druckanstieg in Grubenbauen als Folge von Strömungswiderständen in der Grube
10.9.0.4	hydraulisch bedingter Druckanstieg im Grubengebäude als Folge des hydraulischen Widerstandes im Deckgebirge
10.9.0.6	langfristige Abnahme des hydraulischen Drucks im Grubengebäude durch Verminderung des Oberflächenreliefs
10.11	Mischen von Grubenlösung und zutretender Deckgebirgslösung im Grubengebäude sowie Mineralausfällungen in der Mischzone
10.11.0.1	Grad des Vermischens
10.14	Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge durch Konvergenz und Gasbildung
10.14.0.1	Rate des Lösungsaustritts aus der Grube in das Deckgebirge in der Nachbetriebsphase
10.14.0.2	Rückgang der Lösungsauspressrate nach Einsetzen des Gasaustritts aus der Grube
10.15	dichtebedingter Unterschied des vertikalen Druckgradienten im Grubengebäude und im Deckgebirge an der Flanke des Grubengebäudes
10.15.0.1	vertikaler Druckgradient im Grubengebäude
10.17	Lösung von Gas im Schutzfluid
10.17.1	Lösung von radioaktiven Gasen
10.18	Gasspeicherung im Porenraum des Salzversatzes
10.18.0.1	residuale Gassättigung im Salzversatz
10.18.0.2	Abnahme der Gasspeichervolumina im Salzversatz durch Konvergenz
10.19	Gasspeicherung in der Firstrauhigkeit
10.19.0.1	Gasspeichervolumen in der Firstrauhigkeit
10.20	Gasaufstieg im Nahbereich und im übrigen Grubengebäude
10.20.0.1	lokale Gasspeichervolumina im Nahbereich und im übrigen Grubengebäude, abhängig von Anzahl und Querschnitt der Aufstiegszonen
10.22	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte
10.22.0.4	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte als Folge von FEP 10.11
10.22.0.5	örtliche Unterschiede der Lösungsdichte als Folge des Austretens von Lösung abweichender Dichte aus den Einlagerungskammern (FEP 12.20)
10.23	Temperaturgradient im Grubengebäude
10.26	Lösungsbewegung im Grubengebäude durch Konvergenz und Gasspeicherung
10.31	Bildung eines Gaspolsters im Grubenhöchsten
10.31.0.1	Teufe der Untergrenze des Gaspolsters im Grubenhöchsten
10.32	Lösungsverdrängung durch Bildung eines Gaspolsters im Grubenhöchsten
10.33	Pneumatischer Stützdruck im Grubengebäude während des Einleitens von Schutzfluid oberhalb der 700-m-Sohle
10.34	Austreten von Druckluft aus der Grube in das Deckgebirge nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks in der Grube
-	Kompartiment 11: Abfall, Abfallmatrix, Abfallbehälter
11.1	Radionuklidinventar der Abfälle
11.1.0.1	Radioaktiver Zerfall und Aufbau von Tochternukliden

	FEP der Klasse A
11.2	Konditionierung der Abfälle und Eigenschaften der Abfallmatrix
11.2.0.1	Porosität und Rissgefüge in zementierten und betonierten Abfallmatrizes
11.3	Verpackung der Abfälle und Eigenschaften der Abfallbehälter
11.3.0.1	Ausmaß des Integritätsverlustes der VBA zum Zeitpunkt des Einleitens der Suspension in den ELB
11.3.0.2	Korrosionsrate der Fässer (Metallkorrosion)
11.3.0.3	mechanische Ausfallrate der Gebinde (insbesondere VBA) nach dem Einleiten der Suspension
11.3.0.4	Korrosionsrate von Zement der VBA
11.4	chemotoxisches Inventar der Abfallgebinde
11.5	gasbildendes Stoffinventar der Abfallgebinde
11.6	Gasbildung durch Abfallgebinde
11.8	Gasspeicherung in den Abfallgebinden
11.8.0.1	Gasspeichervolumen in den Abfallgebinden
11.10	Zementkorrosion
11.10.0.1	zeitlicher Fortschritt der Zementkorrosion
11.11	Lösungskontakt von Suspension und Abfall
11.11.0.1	Verzögerung des Lösungskontaktes durch VBA ohne anfänglichen Integritätsverlust (FEP 11.3.0.1)
11.11.1	Mobilisierung durch Zersetzung der Abfallmatrix
11.11.1.1	Mobilisierungsrate und Verzögerung der Mobilisierung
11.11.2	Mobilisierung durch Schadstoffdiffusion aus der Abfallmatrix
11.11.3	Mobilisierung gasförmiger Spezies durch Ausgasen der Abfälle
	Kompartiment 12: Einlagerungsbereich
12.1	hydraulische Wegsamkeiten entlang Auffahrungen zwischen ELB und Nahbereich
12.1.0.1	hydraulischer Widerstand der Strömungsbarrieren
12.1.0.2	hydraulischer Widerstand von Verbindungen ohne Strömungsbarrieren
12.1.0.4	Gaseindringdruck der Wegsamkeiten entlang Auffahrungen zwischen ELB und Nahbereich
12.1.0.5	Beziehung zwischen relativer Gaspermeabilität und Gassättigung von FEP 12.1
12.1.0.7	langfristige Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit von mit Salz versetzten Auffahrungen durch Konvergenz
12.1.0.9	langfristige Desintegration von Strömungsbarrieren durch chemische Wechselwirkungen bei zementdominiertem Milieu
12.2	hydraulische Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen ELB und Nahbereich
12.2.0.1	hydraulischer Widerstand der betrachteten Schweben bzw. des betrachteten Pfeilers zwischen ELB und Nahbereich
12.2.0.4	Gaseindringdruck der hydraulischen Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen ELB und Nahbereich
12.2.0.5	Beziehung zwischen relativer Gaspermeabilität und Gassättigung von FEP 12.2
12.3	Gasbildung durch Metallkorrosion in den ELB
12.3.0.1	Metallinventar in den ELB
12.3.0.3	Gasbildungsrate durch Metallkorrosion inkl. zeitlichem Verlauf
12.3.0.4	Einfluss von chemischem Milieu, Temperatur, Passivierung durch Korrosionsprodukte und Komplexbildner auf die korrosive Gasbildungsrate
12.4	Gasbildung durch mikrobielle Degradation von organischen Stoffen in den ELB

	FEP der Klasse A
12.4.0.1	Inventar organischer Stoffe in den ELB
12.4.0.2	Abnahme des Inventars gasbildender organischer Stoffe während der aeroben Phase
12.4.0.3	Anteil des durch mikrobielle Degradation umgesetzten organischen Inventars
12.4.0.4	Gasbildungsrate durch mikrobielle Degradation von organischen Stoffen inkl. zeitlichem Verlauf
12.4.0.5	CO ₂ / CH ₄ – Verhältnis im mikrobiell gebildeten Gas
12.4.0.6	Einfluss von chemischem Milieu, Temperatur, Nährstoffangebot, Fluiddruck und radioaktiver Strahlung auf die mikrobielle Gasbildungsrate
12.5	Gasbildung durch Radiolyse in den ELB
12.5.0.1	Gasbildungsrate durch Radiolyse inkl. zeitlichem Verlauf
12.6	horizontale hydraulische Wegsamkeiten zwischen den ELK eines ELB im Frist-niveau mit geringem Gaseindringdruck
12.7	Bildung eines Gaspolsters im ELB unter der Firste
12.7.0.1	Mächtigkeit des Gaspolsters im ELB unter der Firste
12.7.1	Austausch von Radionukliden zwischen Gasphase und gelöster Phase durch Lösung und Ausgasung
12.7.1.1	Löslichkeit radioaktiver Gasspezies
12.7.2	Radionuklidtransport im ELB in der Gasphase bis in das Gaspolster unter der Firste
12.8	Behinderung des Lösungsaustritts aus dem ELB über die Firste durch Gaspolster
12.9	Gasaustritt aus dem ELB in den Nahbereich
12.9.1	Austritt von radioaktiven Gasspezies aus dem ELB in den Nahbereich
12.11	Auspressen von Lösung aus dem ELB durch Konvergenz
12.11.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport aus dem ELB in den Nahbereich als Folge von FEP 12.11, 12.12, 12.13 und 12.14
12.11.1.1	Kanalisation des advektiven Radionuklidtransports aus dem ELB in den Nahbereich
12.11.2	diffusiver Radionuklidtransport aus dem ELB in den Nahbereich
12.11.3	Transport gelöster radioaktiver Gasspezies aus dem ELB in den Nahbereich
12.12	Verdrängen von Lösung aus dem ELB durch Gasspeicherung im ELB
12.13	Lösungsaustausch zwischen ELB und Nahbereich durch allgemeine Lösungsbewegung im Grubengebäude
12.14	dichtebedingter Lösungsaustausch zwischen ELB und Nahbereich
12.15	Inventar von Mg-Depot (Brucit) und dessen Umsetzung im ELB
12.15.0.2	Verhältnis von Brucit-Menge und Lösungsvolumen (kammerspezifisch)
12.15.0.3	Verbrauch des Mg-Depots (Brucit) durch Karbonatfällung infolge CO ₂ -Bildung
12.16	Zementinventar im ELB
12.16.0.1	Verhältnis von Zementmenge und Lösungsvolumen (kammerspezifisch)
12.17	Stützwirkung des Versatzes im ELB
12.17.0.1	Stützwirkung von Brucit-Granulat im ELB
12.17.0.2	Stützwirkung von Sorelbeton und mit Sorelmörtel injizierter Salzversatz im ELB
12.17.0.3	Stützwirkung der Abfallbinde einschließlich der VBA und ihrer Korrosionsprodukte
12.18	fluidzugängliches Hohlraumvolumen im ELB
12.18.0.1	Lösungsvolumen in Einlagerungskammern (kammerspezifisch)
12.19	Chemisches Milieu in den Einlagerungskammern eines ELB
12.19.0.1	Unterschiede der chemischen Milieus in den ELK eines ELB

	FEP der Klasse A
12.19.0.2	Einwirkung der Brucit-Zugabe im Schutzfluid auf das chemische Milieu
12.19.0.3	Einwirkung des Brucit-Granulats auf das chemische Milieu
12.19.0.4	rasche Einstellung von reduzierenden Redoxbedingungen durch Metallkorrosion
12.19.0.6	Einwirkung der Zementkorrosion auf das chemische Milieu
12.19.0.7	Einwirkung der CO ₂ -Bildung auf das chemische Milieu
12.19.0.8	Einwirkung des Lösungskontaktes mit Carnallit auf das chemische Milieu
12.19.0.9	Einwirkung der Nachlösung von Steinsalz auf das chemische Milieu
12.19.0.10	gegenseitige Beeinflussung der chemischen Milieus von benachbarten Kammern als Folge von FEP 12.22
12.19.0.11	Beeinflussung des chemischen Milieus in den Einlagerungskammern durch Lösungszutritt aus dem Nahbereich
12.19.0.14	Beeinflussung des chemischen Milieus durch Wechselwirkung mit Sorelbeton bei zementdominiertem Milieu
12.20	Lösungsdichte in den Einlagerungskammern eines ELB
12.20.0.2	Dichteänderung durch Zementkorrosion (FEP 11.10)
12.20.0.3	Dichteänderung durch Wechselwirkung mit Mg-Depot (Brucit-Granulat)
12.21	Mischung innerhalb einer ELK
12.21.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport innerhalb der ELK
12.21.1.1	Kanalisation des advektiven Radionuklidtransports innerhalb der ELK
12.21.2	diffusiver Radionuklidtransport innerhalb der ELK
12.22	Lösungsaustausch zwischen Kammern eines ELB
12.22.0.1	Rate des Lösungsaustausches zwischen Kammern eines ELB
12.22.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport zwischen Kammern eines ELB
12.22.1.1	Kanalisation des advektiven Radionuklidtransports zwischen Kammern eines ELB
12.22.2	diffusiver Radionuklidtransport zwischen Kammern eines ELB
12.23	Speziation und Löslichkeit eines Radionuklids im ELB
12.23.0.1	Abhängigkeit der Speziation und der Löslichkeit vom chemischen Milieu
12.23.0.3	Abhängigkeit der Löslichkeit von Komplexbildnern
12.23.0.4	Abhängigkeit der Löslichkeit von Kolloiden
12.23.0.5	Abhängigkeit der Löslichkeit von der Ionenstärke
12.23.0.6	zeitliche Änderung der Löslichkeit infolge Änderung des chemischen Milieus
12.23.1	Ausfällung von Radionukliden außerhalb der Abfallgebinde
12.23.2	Lösung von Radionukliden durch zeitliche Änderung der Löslichkeit
12.23.3	Lösung von ausgefällten Radionukliden bei Lösungsaustausch
12.23.4	Ausfällung von gelösten Radionukliden bei Lösungsaustausch
12.24	Sorption im System Zementstein, Eisen und deren Korrosionsprodukten
12.24.1	Übertritt von Radionukliden in die sorbierte Phase im System Zementstein, Eisen und deren Korrosionsprodukten
12.24.2	Desorption von sorbierten Radionukliden bei Lösungsaustausch im ELB
12.28	Kontaktfläche zwischen Lösung und Sorelbeton in der MAW-Kammer
12.31	Korrosion von Sorelbeton in der MAW-Kammer durch zementbeeinflusste Lösung
12.31.0.1	mittlere Tiefe der Korrosion von Sorelbeton als Folge von FEP 12.31
12.31.0.2	Bildung von neuem Porenvolumen in der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.31

	FEP der Klasse A
	Kompartiment 13: Nahbereich der ELB
13.1	hydraulische Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen Nahbereich und Kompartiment 14
13.1.0.1	hydraulischer Widerstand der betrachteten Schweben bzw. des betrachteten Pfeilers zwischen Nahbereich und Kompartiment 14
13.1.0.3	Gaseindringdruck von Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler zwischen Nahbereich und Kompartiment 14
13.1.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport vom Nahfeld in das Kompartiment 14 entlang den Wegsamkeiten von FEP 13.1 und 13.9
13.1.2	diffusiver Radionuklidtransport vom Nahfeld in das Kompartiment 14 entlang den Wegsamkeiten von FEP 13.1 und 13.9
13.2	Auflockerungszone in der Firste des Carnallit-Baufeldes
13.2.0.1	Permeabilität und wirksamer Querschnitt der Auflockerungszone FEP 13.2
13.3	Gasbildung im Nahbereich der ELB
13.3.0.1	Inventar gasbildender Stoffe im Nahbereich der ELB
13.3.0.2	Gasbildungsrate im Nahbereich
13.4	Lösungsbewegung im Nahbereich aufgrund von Konvergenz und Gasspeicherung
13.4.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport im Nahbereich als Folge von FEP 13.4, 13.5 und 13.6
13.4.1.1	Kanalisation des advektiv/dispersiven Radionuklidtransports im Nahbereich
13.4.1.2	Transportverzögerung durch Diffusion in nicht durchströmte Porenvolumina
13.4.1.3	Transportverzögerung durch Dichteschichtung im MAW-Nahbereich (FEP 13.18)
13.8	verminderte Mischung der Lösung im MAW-Nahbereich aufgrund von Dichteschichtung (FEP 13.18)
13.8.0.1	Grad der Vermischung
13.8.0.2	wirksames Mischvolumen im MAW-Nahbereich
13.9	hydraulische Wegsamkeiten zwischen Nahbereich und Kompartiment 14 entlang Auffahrungen
13.9.0.1	hydraulischer Widerstand von Strömungsbarrieren in Wegsamkeiten FEP 13.9
13.9.0.2	hydraulische Leitfähigkeit von Wegsamkeiten ohne Strömungsbarrieren
13.9.0.3	Gaseindringdruck der Wegsamkeiten entlang Auffahrungen zwischen Nahfeld und Kompartiment 14
13.9.0.4	langfristige Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit von Wegsamkeiten ohne Strömungsbarriere durch Konvergenz
13.10	Mischung von zementbeeinflusster Lösung aus ELB mit „R-Lösung“
13.10.0.1	Anstieg der Dichte der zementbeeinflussten Lösung aus ELB als Folge von FEP 13.10 und 13.11
13.10.1	Verminderung der Radionuklidkonzentration durch Mischung mit radionuklidfreier Lösung FEP 13.10
13.10.2	diffusiver Radionuklidtransport im Nahbereich
13.10.3	Austausch von Radionukliden zwischen Gasphase und gelöster Phase im Nahbereich durch Lösung und Ausgasung
13.12	Umlösung am Carnallit durch zementbeeinflusste Lösung
13.12.0.1	Änderung der Lösungsdichte als Folge von FEP 13.12
13.16	Bildung einer mobilen Gasphase im Nahbereich
13.16.1	Transport radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im Nahbereich
13.18	Dichteschichtung im MAW-Nahbereich

	FEP der Klasse A
13.18.0.1	Mächtigkeit der zementkonditionierten Lösung im Firstbereich
	Kompartiment 14: Übriges Grubengebäude
14.1	hydraulische Wegsamkeiten durch Schweben und Pfeiler im Kompartiment 14
14.1.0.1	hydraulischer Widerstand der betrachteten Schweben bzw. des betrachteten Pfeilers im Kompartiment 14
14.1.0.2	Permeabilität des Salzversatzes in den Abbauen des Baufeldes in der Südflanke
14.2	Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke
14.2.0.1	Permeabilität und wirksamer Querschnitt der Auflockerungszone FEP 14.2
14.2.0.2	Einfluss der Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase auf die Auflockerungszone FEP 14.2
14.2.0.3	Fliessporosität der Auflockerungszone FEP 14.2
14.3	Gasbildung in den übrigen Grubenbauen
14.3.0.1	Inventar gasbildender Stoffe in den übrigen Grubenbauen
14.3.0.2	Gasbildungsrate in den übrigen Grubenbauen
14.4	Lösungsbewegung im Baufeld in der Südflanke aufgrund von Konvergenz und Gasspeicherung
14.4.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport im Baufeld in der Südflanke
14.4.1.1	großräumige Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransports im Baufeld in der Südflanke
14.4.1.2	kleinräumige Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransports im Baufeld in der Südflanke
14.4.1.3	Transportverzögerung durch Diffusion in nicht durchströmte Porenvolumina
14.4.2	diffusiver Radionuklidtransport im Baufeld in der Südflanke
14.5	Kanalisierung der Lösungsbewegung im Baufeld in der Südflanke
14.5.0.1	Grad der Kanalisierung der Lösungsbewegung im Baufeld in der Südflanke
14.6	Lösungsbewegung entlang der Auflockerungszone FEP 14.2 aufgrund von Konvergenz und Gasspeicherung in der Grube
14.6.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport in der Auflockerungszone am Südstoß (FEP 14.2)
14.6.1.1	Kanalisierung des advektiven Radionuklidtransportes in der Auflockerungszone am Südstoß
14.8	Mischung von radionuklidhaltiger Lösung mit radionuklidfreier Lösung
14.8.1	Verminderung der Radionuklidkonzentration durch Mischung mit radionuklidfreier Lösung und durch Diffusion
14.8.3	Verminderung der Radionuklidkonzentration beim Mischen von Grubenlösung und Deckgebirgslösung in der Grube als Folge von FEP 10.11 und 14.8.2
14.9	Chemische Zusammensetzung der aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge austretenden Lösung
14.9.0.1	Dichte der aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge austretenden Lösung
14.11	Bildung einer mobilen Gasphase im Baufeld in der Südflanke
14.11.1	Transport radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im Baufeld in der Südflanke
14.11.2	Speicherung radioaktiver Gasspezies in der Gasphase im Baufeld in der Südflanke
14.11.3	Austausch von Radionukliden zwischen Gasphase und gelöster Phase im Baufeld in der Südflanke durch Lösung und Ausgasung

	FEP der Klasse A
	Kompartiment 15: Wirtsgestein
15.1	Aufbau des Wirtsgesteins
15.2	Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke
15.2.0.1	Größe der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke
15.3	Spannungszustand im Wirtsgestein
15.3.0.1	Änderung des Spannungszustands im Wirtsgestein durch fortschreitende Konvergenz des Grubengebäudes bei Umsetzen der Schließungsmaßnahmen
15.4	Subrosion des Wirtsgesteins
15.4.0.1	Subrosionsrate am Salzspiegel
15.4.0.2	Subrosionsrate an der SW-Flanke der Salzstruktur im Bereich des Grubengebäudes
15.5	Salzkinetik (inkl. Halokinese)
15.5.0.1	Rate der differentiellen Hebung/Senkung des Grubengebäudes unter heutigen Bedingungen
15.6	hydraulische Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (FEP 15.2) im Teufenbereich 500 m bis 574 m
15.6.0.1	Orte der Wegsamkeiten FEP 15.6
15.6.0.2	hydraulische Leitfähigkeit der Wegsamkeiten FEP 15.6
15.6.0.4	strömungswirksamer Querschnitt der Wegsamkeiten FEP 15.6
15.7	Austritt von Lösung aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.7.1	advektiv/dispersiver Radionuklidtransport aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
15.7.2	diffusiver Radionuklidtransport aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
15.8	Verschlüsse der Tagesschächte
15.8.0.1	integraler hydraulischer Widerstand der Verschlüsse der Tagesschächte
15.8.0.2	Gaseindringdruck der Schachtverschlüsse einschließlich der angrenzenden Auflockerungszone
15.8.0.4	Gassättigung der Schachtverschlüsse einschließlich der angrenzenden Auflockerungszone zu Beginn der Nachbetriebsphase
15.25	hydraulische Wegsamkeit und Lösungsfluss entlang der Anhydritmittel vom Salzspiegel westlich Schacht 4 bis zum Kontakt mit dem Rötanhydrit in der Südflanke
15.25.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit FEP 15.25
15.25.1	Hochpressen eines mit FEP 22.5.3 vergleichbaren Anteils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang der Anhydritmittel bis ins Kompartiment 21
	Teilsystem 2 „Hutgestein und Deckgebirge“
	Übergeordnete FEP
20.1	Aufbau von Deckgebirge und Hutgestein
20.2	Auflockerungszone im Deckgebirge (SW-Flanke) bezüglich gebirgsmechanischer Verhältnisse
20.2.0.1	Ausdehnung der Auflockerungszone im Deckgebirge
20.3	Spannungszustand im Deckgebirge (Gewölbewirkung)
20.3.0.1	Abnahme der effektiven Gebirgsspannung im Deckgebirge in der Flanke des Grubengebäudes durch ansteigenden Lösungsdruck zu Beginn der Nachbetriebsphase

	FEP der Klasse A
20.3.0.2	Zunahme der Gebirgsspannung und Abnahme der Hauptspannungsdifferenzen im Deckgebirge an der Flanke des Grubengebäudes durch ansteigende Stützwirkung des Versatzes in der Grube
20.4	Störungen im Deckgebirge
20.4.0.1	Lage der Störungen im Deckgebirge
20.5	hydraulische Randbedingung im Rötanhydrit in der Südflanke (Ort von FEP 15.6)
20.5.0.1	hydraulischer Druck am Ort von FEP 15.6 zu Beginn des Schutzfluid-Einleitens auf der 750-m-Sohle
20.5.0.2	hydraulischer Druck in der mittleren und späten Nachbetriebsphase am Ort von FEP 15.6 (zeitabhängig)
20.5.0.3	vertikaler Druckgradient im Rötanhydrit in der Südflanke (Ort von FEP 15.6)
20.5.0.4	integraler hydraulischer Widerstand des Deckgebirges gegen Lösungsauspressung aus der Grube entlang FEP 15.6
20.5.0.5	langfristige Abnahme des hydraulischen Drucks durch Verminderung des Oberflächenreliefs
20.6	Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung im Wirtsgestein und im Deckgebirge
20.6.0.1	Änderung der Dichte der aus dem Grubengebäude austretenden Lösung durch Mischung mit Deckgebirgslösung und Mineralausfällungen
20.6.1	Verminderung der Radionuklidkonzentration bei der Mischung von Lösung aus der Grube und Deckgebirgslösung
20.7	natürliche Grundwasserbewegung im Deckgebirge und Hutgestein
20.7.0.1	hydraulische Druckdifferenz zwischen dem Muschelkalk in der Südflanke einerseits und dem gut durchlässigen Bereich des Kompartiments 21 andererseits
20.7.0.2	Verlauf der Süß-/Salzwassergrenze im Deckgebirge/Hutgestein
20.7.1	Ausbreitung der kontaminierten Lösung im Deckgebirge/Hutgestein mit Dichte- einwirkung
20.7.1.1	Änderung der Dichte der kontaminierten Lösung während der Ausbreitung im Deckgebirge/Hutgestein durch Mischung mit unbeeinflusstem Porenwasser
20.7.1.2	lokale Erhöhung der Porenwasserdichte im Deckgebirge durch das Auspressen von unkontaminiertem Schutzfluid vor dem Austreten von Radionukliden
20.14	Oberflächenrelief
20.14.0.1	Veränderungen des Oberflächenreliefs
20.15	regionale Hebung
20.15.0.1	Rate der regionalen Hebung
20.16	regionale Erosion (Denudation)
20.16.0.1	Rate der regionalen Erosion (Denudation)
20.17	differentielle Erosion der Infiltrationszonen auf dem Asse Höhenzug
20.17.0.1	Rate der differentiellen Erosion
20.26	Entstehung einer an Lösung ungesättigten Zone im Deckgebirge nahe der Übertrittsstelle FEP 15.6 durch das Austreten von Druckluft in der Betriebsphase (FEP 10.33)
20.26.0.1	Ausdehnung des an Lösung ungesättigten Deckgebirgsbereichs nahe des Orts von FEP 15.6
20.26.0.2	Fluiddruck nach Aufbringen des pneumatischen Stützdrucks und während der frühen Nachbetriebsphase am Ort von FEP 15.6 (zeitabhängig)

	FEP der Klasse A
	Kompartiment 21: Hutgestein und verstürztes Deckgebirge
21.1	Aufbau von verstürztem Deckgebirge und Hutgestein
21.2	Grundwasserfluss im Kompartiment 21
21.2.0.1	hydraulische Durchlässigkeit des verstürzten Deckgebirges NW der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg
21.2.0.2	hydraulischer Kontakt zwischen dem Rötanhydrit und dem Kompartiment 21
21.2.0.3	langzeitige Abnahme der Höhendifferenz zwischen der Infiltrationszone auf dem Asse Höhenzug und der Exfiltrationszone bei Groß Denkte
21.2.0.4	hydraulische Durchlässigkeit des verstürzten Deckgebirges im Vahlberger Abschnitt
21.2.4	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Bereich des Geländeeinschnittes entlang der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg
21.4	unterirdische Wasserscheide der Grundwasserzirkulation im Kompartiment 21 bezüglich NW-SE-licher Fliessrichtung
21.4.0.1	Ort der unterirdischen Grundwasserscheide
21.5	Vermischung der Lösung mit unkontaminierten Salzwässern im Kompartiment 21
21.5.0.1	Verdünnungsrate bis Groß Denkte (Basis Kompartiment 21)
21.5.0.2	Verdünnungsrate im Raum Groß Denkte von der Basis des Kompartiments 21 bis zur Geländeoberfläche
21.5.0.3	Verdünnungsrate bis zu den Störungen Ammerbeek und Groß Vahlberg
21.5.0.4	Verdünnungsrate im Bereich des Geländeeinschnittes entlang der Störungen Ammerbeek und Gr. Vahlberg von der Basis des Kompartiments 21 bis zur Geländeoberfläche
21.7	fortschreitender Versturz des Deckgebirges über dem Salzspiegel
21.7.0.1	Versturzrate des Deckgebirges
21.8	hydraulischer Kontakt zwischen dem verstürzten Deckgebirge und dem Muschelkalk der NE-Flanke im Vahlberger Abschnitt
	Kompartiment 22: Rötanhydrit (so1A) der SW-Flanke
22.1	bergbaubedingte Auflockerungszone im Rötanhydrit so1A in der SW-Flanke
22.1.0.1	Ausdehnung der bergbaubedingten Auflockerungszone im so1A
22.1.0.3	erhöhte Permeabilität des bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit so1A
22.1.0.4	Kluft- und zugängliche Matrixporosität des bergbaubedingt aufgelockerten Rötanhydrit so1A
22.2	Folgen der geogenen Beanspruchung im Rötanhydrit
22.2.0.1	hydraulische Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit
22.2.0.2	Ansteigen der hydraulischen Leitfähigkeit des geogen beanspruchten Rötanhydrit durch Verkarstung (Bezug zu FEP 22.3.0.1)
22.3	Verkarstung des Rötanhydrit
22.3.0.1	Fortschreiten der Verkarstung bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase
22.5	Grundwasserfluss im Rötanhydrit
22.5.0.1	Änderung des hydraulischen Gradienten im Rötanhydrit durch das Auspressen von Grubenlösung
22.5.0.2	Unterbruch des schichtparallelen Grundwasserflusses im Rötanhydrit durch Versatz an Störungen
22.5.1	schichtparalleler Transport im Rötanhydrit im Bereich der bergbaubedingten Auflockerung mit Dichteeinwirkung

	FEP der Klasse A
22.5.1.1	Sorption im bergbaubedingt aufgelockertem Rötanhydrit
22.5.2	schichtparalleler Transport im geogen beanspruchten Rötanhydrit mit Dichte- einwirkung (bis zu den Einschnitten Wittmar und Ammerbeek)
22.5.2.1	Sorption im Rötanhydrit außerhalb des bergbaubedingt aufgelockerten Berei- ches
22.6	Vermischung mit unkontaminiertem Porenwasser im Rötanhydrit
22.6.0.1	Verdünnungsrate im Rötanhydrit.
	Kompartiment 23: Rötäquitard (so2-so4) der SW-Flanke
23.1	bergbaubedingte Auflockerungszone im Rötäquitard so2-so4 in der SW-Flanke, speziell Scherdeformationsbereich S3/D9
23.1.0.1	Ausdehnung der bergbaubedingten Auflockerungszone des Rötäquitards
23.1.0.3	Permeabilität der bergbaubedingten Auflockerungszone im Rötäquitard
	Kompartiment 24: Muschelkalkaquifer der SW-Flanke
24.1	Grundwasserfluss im Muschelkalkaquifer
24.1.0.1	Exfiltrations- und Infiltrationsverhältnisse im Bereich der Störungen von Wittmar und Ammerbeek
24.1.1	schichtquerender Transport im Muschelkalkaquifer entlang Störungszonen mit Dichteeinwirkung
24.1.1.1	Sorption im Muschelkalkaquifer
24.1.2	schichtparalleler advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Muschelkalk mit Ein- fluss von Dichteeffekten
24.1.3	Matrixdiffusion bei advektiv/dispersivem Transport im Muschelkalk
24.2	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Muschelkalkaquifer
24.2.0.1	Verdünnungsrate im Muschelkalkaquifer
	Kompartiment 25: Deckgebirge im stratigraphisch Hangenden des Mu- schelkalk in der SW-Flanke
keine	
	Kompartiment 26: Geringleiter des Unteren Buntsandstein (su) in der NE- Flanke
keine	
	Kompartiment 27: Aquifer des Unteren Buntsandstein (su-p) in der NE- Flanke
27.1	Grundwasserfluss im Rogenstein
27.1.0.1	Exfiltrations- und Infiltrationsverhältnisse im Bereich der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
27.2	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Rogenstein
27.2.0.1	Verdünnungsrate im Rogenstein
	Kompartiment 28: Deckgebirge im stratigraphisch Hangenden des Roge- stein (su-p) in der NE-Flanke
28.2	Wegsamkeiten und Grundwasserfluss aus dem Vahlberger Abschnitt des ver- stürzten Deckgebirges über hydraulisch wirksame Kontakte direkt in den Mu- schelkalk der NE-Flanke
28.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang FEP 28.2 mit Dichteeinwirkung

	FEP der Klasse A
28.3	Vermischung mit unkontaminiertem Wasser im Hangenden des Rogenstein
28.3.0.1	Verdünnungsrate im Hangenden des Rogenstein
	Kompartiment 29: Oberflächennahe Grundwasserleiter
29.1	Grundwasserfluss und Grundwasserumsatz im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger
29.1.0.1	Veränderung von Grundwasserfluss und -umsatz durch Änderung des Oberflächenreliefs
29.1.1	Freisetzung von Radionukliden in den oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger
29.2	Verdünnung im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger
29.2.0.1	Verdünnungsrate im oberflächennahen, nutzbaren Grundwasserträger
29.3	Quartärrinnen entlang von Quer- und Diagonalstörungen
29.3.0.1	Tiefenerstreckung der Quartärrinnen
29.3.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang von Quartärrinnen

Exemplar für BMBF

Anhang C.2: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für das Nahfeld-Referenzszenario

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G für das Referenzszenario und die zugehörigen Szenariengruppe
11.11.0.2	vernachlässigbares Zutreten von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.29
11.11.1.4	vernachlässigbare Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.2
12.29	Behinderung des Eindringens von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer durch eingeschlossene Grubenluft ab der frühen Nachbetriebsphase
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts

Exemplar für BMBF und BMU

Anhang C.3: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Nahfeld-Szenariengruppe acM

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G für die Nahfeld-Szenariengruppe acM „abweichendes chemisches Milieu in den Einlagerungsbereichen“
11.11.0.2	vernachlässigbares Zutreten von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.29
11.11.1.4	vernachlässigbare Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.2
12.26	deutlich reduzierte Radionuklid-Rückhaltung durch Löslichkeit und Sorption wegen erheblich abweichendem chemischem Milieu gegenüber der Szenariengruppe des Referenzszenarios (ELB-spezifisch)
12.29	Behinderung des Eindringens von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer durch eingeschlossene Grubenluft ab der frühen Nachbetriebsphase
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts

Exemplar für BMBWF/UMW

Anhang C.4: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _G für die Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW „Lösungszutritt in den Fasskegel der MAW-Kammer“
11.6.0.1	eingeschränkte Gasbildung in der MAW-Kammer als Folge eines begrenzten Anstiegs des Lösungspegels im Fasskegel
11.6.0.2	Unterbrechung der Gasbildung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.3
11.11.0.3	Unterbrechung des Lösungskontakts mit den Abfallgebinden in der MAW-Kammer durch Anwachsen des Gaspolsters
11.11.1.2	eingeschränkte Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge eines begrenzten Anstiegs des Lösungspegels im Fasskegel
11.11.1.3	Unterbrechung der Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.3
12.30	hydraulische Wegsamkeit von der MAW-Kammer in der aufgelockerten Sohle und entlang der Auflockerungszone des Durchhiebs in die Kammer 8/511
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts

Anhang C.5: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe vZdSB

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe vZdSB „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“
11.11.0.2	vernachlässigbares Zutreten von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.29
11.11.1.4	vernachlässigbare Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.2
12.29	Behinderung des Eindringens von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer durch eingeschlossene Grubenluft ab der frühen Nachbetriebsphase
15.2.0.2	Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts

Exemplar für BMBF

Anhang C.6: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe GTs

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe GTs „Gasabfluss entlang Tagesschächte“
11.11.0.2	vernachlässigbares Zutreten von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer als Folge von FEP 12.29
11.11.1.4	vernachlässigbare Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge von FEP 11.11.0.2
12.29	Behinderung des Eindringens von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer durch eingeschlossene Grubenluft ab der frühen Nachbetriebsphase
15.10	erheblicher Gasaustritt aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte
15.10.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte als Folge von FEP 15.10
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts

Exemplar für BMBF

Anhang C.7: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe Vg

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_G für die Szenariengruppe Vg „Vergletscherung des Standortes“
10.2.0.1	Ansteigen der Gebirgsspannung während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
10.4.0.6	Lösungszutritt nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23
10.6.0.8	Ansteigen der Konvergenzrate während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
10.9.0.7	erhöhter hydraulischer Druck im Grubengebäude während einer Vereisung des Standortes
11.11.1.2	eingeschränkte Mobilisierung in der MAW-Kammer als Folge eines begrenzten Anstiegs des Lösungspegels im Fasskegel
12.30	hydraulische Wegsamkeit von der MAW-Kammer in der aufgelockerten Sohle und entlang der Auflockerungszone des Durchhiebs in die Kammer 8/511
15.3.0.2	Ansteigen der Gebirgsspannung im Wirtsgestein während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
15.4.0.3	erhöhte Subrosionsrate bei Eisüberlagerung
15.7.0.1	Reaktivierung des Lösungsaustritts entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23
15.7.1.1	Reaktivierung des Radionuklidtransports entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
15.22	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstützte Deckgebirge durch Bildung von Klüften im Wirtsgestein im Zusammenhang mit Permafrost nach rund 100'000 Jahren
15.22.1	Radionuklidtransport entlang FEP 15.22 oder FEP 15.23 nach 100'000 Jahren oder mehr bei Vereisung des Standortes
15.23	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstützte Deckgebirge durch Absinken des Salzspiegels nach mehreren 100'000 Jahren
20.5.0.6	erhöhter hydraulischer Druck während einer Vereisung des Standortes
20.9	klimatische Entwicklung mit Vereisung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“)
20.9.0.1	Mächtigkeit des Gletschers
20.9.0.2	erhöhte Auspressrate von Lösung aus dem Grubengebäude während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort

Anhang C.8: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für das Referenzszenario

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _N für das Referenzszenario und die zugehörigen Szenariengruppe
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts
21.2.2	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung zwischen der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) und dem Bereich Gr. Vahlberg
23.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Radionuklidtransport durch den bergbaubedingt aufgelockerten Rötäquitard so ₂ -so ₄ mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
23.1.1.1	Sorption im Rötäquitard
23.2	schichtquerende Störungen im Rötäquitard mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit
23.2.0.1	Verlauf der Störungen im Rötäquitard
23.2.0.2	Transmissivität der Störungen im Rötäquitard
23.2.1	Transport entlang schichtquerender Störungen im Rötäquitard mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
25.1	Wegsamkeiten im Kompartiment 25 (vorwiegend entlang Störungszonen)
25.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Kompartiment 25 mit Dichteeinwirkung
25.1.1.1	Sorption im Kompartiment 25
26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung
26.1.1.1	Sorption im Unteren Buntsandstein
27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung
28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung

Anhang C.9: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Geosphären-Szenariengruppe vD-W

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _N für die Geosphären-Szenariengruppe vD-W „verstärktes Deckgebirge – West“
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts
21.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung in strukturparalleler Richtung gegen Groß Denkte
21.2.3	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte
21.2.3.1	Sorption zwischen der Basis des Kompartiments 21 und der Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte
21.3	Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE durch fortschreitende Subrosion
21.4.0.2	Verlagerung der unterirdischen Grundwasserscheide gegen SE gekoppelt an FEP 21.3
22.5.3	Hochpressen des größten Teils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit bis ins Kompartiment 21

Exemplar für MBF und BML

Anhang C.10: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Geosphären-Szenariengruppe vD-E

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B _N für die Geosphären-Szenariengruppe vD-E „verstürztes Deckgebirge – Ost“
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts
21.2.2	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung zwischen der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) und dem Bereich Gr. Vahlberg
21.2.2.1	Sorption im verstürzten Deckgebirge SE der Subrosionsgerinne
22.5.3	Hochpressen des größten Teils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit bis ins Kompartiment 21
26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung
26.1.1.1	Sorption im Unteren Buntsandstein
27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung
28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung

Anhang C.11: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe vZdSB

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe vZdSB „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“
15.2.0.2	Vergrößerung der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke durch Verformungen bis Ende der frühen Nachbetriebsphase
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
20.2.0.3	subrosionsbedingte Vergrößerung der Auflockerungszone
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts
21.2.2	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung zwischen der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) und dem Bereich Gr. Vahlberg
21.2.2.1	Sorption im verstützten Deckgebirge SE der Subrosionsgerinne
23.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Radionuklidtransport durch den bergbaubedingt aufgelockerten Röttaquitard so ₂ -so ₄ mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
23.1.1.1	Sorption im Röttaquitard
23.2	schichtquerende Störungen im Röttaquitard mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit
23.2.0.1	Verlauf der Störungen im Röttaquitard
23.2.0.2	Transmissivität der Störungen im Röttaquitard
23.2.1	Transport entlang schichtquerender Störungen im Röttaquitard mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
25.1	Wegsamkeiten im Kompartiment 25 (vorwiegend entlang Störungszonen)
25.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Kompartiment 25 mit Dichteeinwirkung
25.1.1.1	Sorption im Kompartiment 25
26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung
26.1.1.1	Sorption im Unteren Buntsandstein
27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung
28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung

Anhang C.12: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe GTs

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe GTs „Gasabfluss entlang Tagesschächte“
15.10	erheblicher Gasaustritt aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte
15.10.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Hutgestein entlang der verschlossenen Tagesschächte als Folge von FEP 15.10
20.8	klimatische Referenzentwicklung (ohne Vereisung des Standortes, Typ „Wechsel-Vereisung“)
20.8.0.1	Mächtigkeit des Permafrosts
21.2.2	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung zwischen der unterirdischen Grundwasserscheide (FEP 21.4) und dem Bereich Gr. Vahlberg
21.2.2.1	Sorption im verstützten Deckgebirge SE der Subrosionsgerinne
23.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Radionuklidtransport durch den bergbaubedingt aufgelockerten Röttaquitard so ₂ -so ₄ mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
23.1.1.1	Sorption im Röttaquitard
23.2	schichtquerende Störungen im Röttaquitard mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit
23.2.0.1	Verlauf der Störungen im Röttaquitard
23.2.0.2	Transmissivität der Störungen im Röttaquitard
23.2.1	Transport entlang schichtquerender Störungen im Röttaquitard mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
25.1	Wegsamkeiten im Kompartiment 25 (vorwiegend entlang Störungszonen)
25.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Kompartiment 25 mit Dichteeinwirkung
25.1.1.1	Sorption im Kompartiment 25
26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung
26.1.1.1	Sorption im Unteren Buntsandstein
27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung
28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung

Anhang C.13: Liste der FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe Vg

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe Vg „Vergletscherung des Standortes“
15.3.0.2	Ansteigen der Gebirgsspannung im Wirtsgestein während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
15.4.0.3	erhöhte Subrosionsrate bei Eisüberlagerung
15.7.0.1	Reaktivierung des Lösungsaustritts entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23
15.7.1.1	Reaktivierung des Radionuklidtransports entlang FEP 15.6 nach 100'000 Jahren oder später als Folge von FEP 15.22 oder FEP 15.23
15.11	Gasaustritt aus der Grube in die Südflanke des Deckgebirges entlang FEP 15.6
15.11.1	Transport von radioaktiven Gasspezies in der Gasphase aus der Grube in das Deckgebirge entlang FEP 15.6
15.22	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Bildung von Klüften im Wirtsgestein im Zusammenhang mit Permafrost nach rund 100'000 Jahren
15.22.1	Radionuklidtransport entlang FEP 15.22 oder FEP 15.23 nach 100'000 Jahren oder mehr bei Vereisung des Standortes
15.23	Entstehung einer neuen Wegsamkeit vom Grubengebäude in das verstürzte Deckgebirge durch Absinken des Salzspiegels nach mehreren 100'000 Jahren
20.2.0.3	subrosionsbedingte Vergrößerung der Auflockerungszone
20.3.0.3	Änderung des Spannungszustandes, glazial bedingt
20.5.0.6	erhöhter hydraulischer Druck während einer Vereisung des Standortes
20.7.0.3	Entwässerung des Gletschers über eine Senke über dem verstürzten Deckgebirge in eine subglaziale Rinne in der Okertalung bei Vergletscherung des Standortes
20.9	klimatische Entwicklung mit Vereisung des Standortes (Typ „Saale-Vereisung“)
20.9.0.1	Mächtigkeit des Gletschers
20.9.0.2	erhöhte Auspressrate von Lösung aus dem Grubengebäude während des Vorrückens des Eisrandes über den Standort
21.2.0.5	erhöhter Grundwasserfluss im Kompartiment 21 bei Vergletscherung
21.2.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport des größten Teils der in das Kompartiment 21 hochgepressten Lösung in strukturparalleler Richtung gegen Groß Denkte
21.2.3	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport von der Basis des Kompartiments 21 zur Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte
21.2.3.1	Sorption zwischen der Basis des Kompartiments 21 und der Geländeoberfläche im Raum Groß Denkte
21.3	Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen SE durch fortschreitende Subrosion
21.4.0.2	Verlagerung der unterirdischen Grundwasserscheide gegen SE gekoppelt an FEP 21.3
22.5.3	Hochpressen des größten Teils der in das Deckgebirge austretenden kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit bis ins Kompartiment 21
23.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Radionuklidtransport durch den bergbaubedingt aufgelockerten Röttaquitard so ₂ -so ₄ mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
23.1.1.1	Sorption im Röttaquitard

	FEP der Klasse B ohne Unterklasse B_N für die Szenariengruppe Vg „Vergletscherung des Standortes“
23.2	schichtquerende Störungen im Rötäquitard mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit
23.2.0.1	Verlauf der Störungen im Rötäquitard
23.2.0.2	Transmissivität der Störungen im Rötäquitard
23.2.1	Transport entlang schichtquerender Störungen im Rötäquitard mit Dichteeinwirkung in anteilig relevantem Maße
25.1	Wegsamkeiten im Kompartiment 25 (vorwiegend entlang Störungszonen)
25.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Kompartiment 25 mit Dichteeinwirkung
25.1.1.1	Sorption im Kompartiment 25
26.1	hydraulische Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.0.1	Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
26.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport in der Tiefe entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg mit Dichteeinwirkung
26.1.1.1	Sorption im Unteren Buntsandstein
27.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport im Rogenstein mit Dichteeinwirkung
28.1	Wegsamkeiten im Hangenden des Rogenstein entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg
28.1.1	advektiv-dispersiv-diffusiver Transport entlang der Diagonalstörung von Gr. Vahlberg im Hangenden des Rogenstein mit Dichteeinwirkung

Exemplar für PIA und BIA