

Projekt ANSICHT

**Szenarienentwicklung
für das
Endlagerstandortmodell NORD**

- Methodik und Anwendung -



PROJ	PSP	OBJ	FUNK	KOMP	BAUG	AG	UA	LFNR	RV
FE						BY	BY	0014	00

DOKID: 11780532
ULV-Nr.: 659488

Projekt ANSICHT

Szenarienentwicklung für das Endlagerstandortmodell NORD

- Methodik und Anwendung -

Autoren:	A. Lommerzheim A. Bebiolka S. Jahn M. Jobmann A. Meleshyn S. Mrugalla K. Reinhold A. Rübel L. Stark
----------	---

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des F&E-Vorhabens **ANSICHT**
(Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein)

Auftraggeber:	KIT (PTKA-WTE)	FKZ: 02E11061B
Berichtsnummer:	TEC-17-2014-AP	

30.06.2015

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi von der BGR sowie vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA

Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Begriffsbestimmungen	5
3	Methodik der Szenarienentwicklung	8
3.1	Grundlagen.....	9
3.1.1	Rahmenbedingungen	9
3.1.2	Grundlegende Annahmen.....	11
3.1.3	Geologische Standortbeschreibung	11
3.1.4	Abfallspezifikation und Mengengerüst.....	12
3.1.5	Endlagerkonzept.....	12
3.2	FEP-Katalog	12
3.3	Szenarien	13
3.3.1	Ableitung eines Referenzszenariums.....	13
3.3.2	Ableitung von Alternativszenarien.....	16
3.4	Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen	19
3.5	Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle	21
4	Ausgangssituation	23
4.1	Geologie	23
4.2	Endlagerkonzept.....	26
4.2.1	Abfallgebäude.....	26
4.2.2	Grubengebäude.....	27
4.2.3	Einlagerungskonzept	27
4.2.4	Verfüll- und Verschlusskonzept.....	28
5	Die zeitlich veränderliche Ausprägung systemrelevanter FEP	32
6	Referenzszenario.....	36
6.1	Randbedingungen	36
6.1.1	Klimabild	36
6.1.2	Spezifische Annahmen	39
6.2	Beschreibung des Referenzszenarios.....	40
6.2.1	Teilsystem „Nahfeld“.....	40
6.2.2	Teilsystem „Strecken und Schächte“.....	44
6.2.3	Teilsystem „Wirtsgestein“.....	51
6.2.4	Teilsystem „Nebengebirge“	53
7	Alternativszenarien	55
7.1	Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen	55
7.1.1	Bestimmung möglicher Alternativen.....	56
7.1.2	Alternative Betrachtung zur Funktion der Schacht- und Streckenverschlüsse.....	58
7.1.3	Alternative Betrachtung zur Funktion der Nahfeldbarrieren.....	65
7.2	Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP	69
7.2.1	Alteration von Tonmineralen	70
7.2.2	Auswirkungen auf die Systementwicklung und Bewertung des FEP	72

7.3	Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes	74
7.3.1	Radionuklidmobilisierung	74
7.3.2	Radionuklidtransport.....	76
7.3.3	Auswirkungen auf die Systementwicklung und Bewertung des FEP	77
7.4	Weniger wahrscheinliche FEP	78
7.4.1	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	78
7.4.2	Bewertung der Konsequenzen des FEP Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	81
8	Vergleich mit den Ergebnissen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben	83
8.1	Referenzszenario.....	83
8.2	Alternativszenarien	86
9	Zusammenfassung	88
10	Literaturverzeichnis.....	91

Anlagenband: Einflüsse auf die Ausprägungen

1 Einleitung

Das Vorhaben ANSICHT hat das Ziel, eine Methodik zum Sicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Tongestein zu entwickeln und deren Anwendbarkeit für generische Endlagerstandorte in Nord- und Süddeutschland zu testen. Die entsprechenden Arbeiten setzen auf den Ergebnissen der „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) (Mönig et al. 2012) auf. Sie sollen einerseits eine Adaption der Methodik an das Wirtsgestein Ton durchführen und andererseits die Methodik entsprechend erkannter Schwächen weiter optimieren. Der Grundansatz der Methodik ist dabei ein ganzheitliches Konzept, das die gesetzlichen und geologischen Randbedingungen, ein Endlager- und Verschlusskonzept, sowie die mögliche zukünftige Entwicklung des Endlagersystems berücksichtigt. Zur Erhöhung der Vergleichbarkeit wurde für den folgenden Bericht die Struktur des VSG-Berichtes übernommen. Weiterhin wurde die Beschreibung von den Teilen der Methodik, die auf Ton übertragbar ist, beibehalten.

Der sichere Einschluss von radioaktiven Abfällen in einem Endlager ist im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises zu belegen. Dazu ist unter Einbeziehung der zeitlichen Veränderungen, die der Standort und das Endlagersystem im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre erfahren können, nachzuweisen, dass die BMU-Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (im folgenden "Sicherheitsanforderungen (BMU 2010)" genannt) eingehalten werden. Dabei stellen numerische Analysen mit der Berechnung von verschiedenen Indikatorwerten wichtige Elemente dar.

Voraussetzung für die Durchführung dieser numerischen Analysen sind Vorstellungen zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems. Die Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems werden einerseits durch die natürlichen Einwirkungen (geologische und klimatische Entwicklungsmöglichkeiten) sowie andererseits durch die endlagerspezifischen Einwirkungen (von den eingelagerten Abfällen und der Auslegung und Konzeption des Endlagers) beeinflusst.

Die globalen, regionalen und lokalen geologischen und klimatischen Abläufe in der Vergangenheit können auf der Basis umfangreicher, zumeist empirischer Daten beschrieben und belegt werden. Hieraus wird ein Verständnis des Zusammenhangs der langzeitlichen Prozesse und der sonstigen Einflussfaktoren, die die Entwicklung im Bereich des Referenzprofils Nord in der Vergangenheit bestimmt haben, zu entwickeln. Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems wird unterstellt, dass dieselben Prozesse und Einflussfaktoren wie in der Vergangenheit auch bei den zukünftigen geologischen und klimatischen Abläufen wirken (Aktualitätsprinzip). Als zusätzliche Einflussfaktoren kommen die Wirkungen hinzu, die durch die Errichtung des Endlagers und die Einlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund hervorgerufen werden.

Die betrachtete Modellregion mitsamt einem Endlager wird zukünftig genau eine Entwicklung durchlaufen. Trotz der umfangreichen Kenntnisse der verschiedenen Einflussfaktoren kann diese tatsächliche Entwicklung des Endlagersystems für den Nachweiszeitraum nicht belastbar in allen Einzelaspekten und Details prognostiziert werden. So sind Zeitpunkte und Ausprägungen bestimmter zukünftiger Ereignisse für das Endlagerstandortmodell nicht eindeutig bestimmbar. Die daraus resultierende Ungewissheit können auch an einem konkreten Standort durch Erkundungs- und Forschungsarbeiten nur in einem begrenzten Maße verringert werden. Beispielsweise kann das Auftreten von Kaltzeiten mit Permafrostbildung in Norddeutschland innerhalb der nächsten 1 Million Jahre als gesichert angesehen werden, aber eine exakte Vorhersage, wann diese Kaltzeiten auftreten und bis in welche Gebiete der mit den Kaltzeiten einhergehende Vorstoß der Inlandeisgletscher aus dem Norden führt, ist nicht möglich. Aus der geologischen Vergangenheit können lediglich Bandbreiten für das zyklische Auftreten der Kaltzeiten sowie für deren mögliche Ausprägungen abgeleitet werden.

Daher wurde für das F&E-Vorhaben ANSICHT auf Basis einer systematischen Analyse relevanter Einflussfaktoren eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder entworfen. Dies geschieht mit Hilfe einer Szenarienentwicklung, deren Ziel die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von Szenarien zu möglichen Entwicklungen des Endlagersystems ist, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit nach dem Verschluss des Endlagers relevant sind. Besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, diejenigen Entwicklungsmöglichkeiten zu erfassen, bei denen es zu einer Mobilisierung und einem Transport von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen kommen kann. So wurde im Rahmen der Szenarienentwicklung eine Reihe von aus naturwissenschaftlicher Sicht plausiblen Entwicklungsmöglichkeiten für das Endlagerstandortmodell Nord abgeleitet. Der vorliegende Bericht beschreibt die Methodik der Szenarienentwicklung und die im F&E-Vorhaben ANSICHT abgeleiteten Szenarien.

2 Begriffsbestimmungen

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

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

Laut BMU (2010) beschreibt ein **Szenarium** eine von den derzeitigen Standortgegebenheiten ausgehende und aufgrund geowissenschaftlicher oder sonstiger Überlegungen mehr oder weniger wahrscheinliche Entwicklung¹ des Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften nach der Stilllegung des Endlagers. Diese Entwicklung wird durch die Ausgangssituation sowie durch zukünftige Ereignisse und Prozesse bestimmt. Es können auch mehrere Entwicklungen zu einem Szenarium zusammengefasst werden.

Die im F&E-Vorhaben ANSICHT abgeleiteten Szenarien stellen Abstraktionen zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems dar. Sie können nur einen bestimmten Zeitbereich oder nur einen Teil des Endlagersystems betreffen. Ziel ist, dass die Gesamtheit der in der Szenarientwicklung abgeleiteten Szenarien die Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems abdecken soll.

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

Das **Referenzszenarium** beschreibt eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender, möglicher Entwicklungen des Endlagersystems. Es ergibt sich unter vorher festgelegten Annahmen aus der Berücksichtigung der wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren und den FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Zugrunde gelegt wird die wahrscheinliche Ausprägung dieser FEP.

Die **Ausprägung** sagt aus, in welcher Intensität das jeweilige FEP auftritt. Dabei kann es sich um eine qualitative Beschreibung oder um einen quantitativen Wert bzw. Wertebereich handeln. FEP können verschiedene Ausprägungen aufweisen, die als wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich bzw. unwahrscheinlich eingeordnet werden können oder die sich aus der jeweils betrachteten Systementwicklung ergeben. Es handelt sich bei der Ausprägung um bedingte Wahrscheinlichkeiten. Die Bedingung ist, dass die notwendigen Voraussetzungen für das Eintreten des FEP am Standort vorliegen bzw. in Zukunft zu erwarten sind.

Eine "wahrscheinliche Ausprägung" ist die Entwicklung des FEP, die aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen zu erwarten ist.

"Weniger wahrscheinliche Ausprägungen" beschreiben Extremwerte der Bandbreite, die aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen noch möglich sind.

"Unwahrscheinliche Ausprägungen" können aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen nicht auftreten.

¹ In der Definition des Begriffs Szenarium in den Sicherheitsanforderungen BMU (2010) wird der Begriff Entwicklung verwendet. Um deutlich zwischen Entwicklungen, die in der Vergangenheit abgelaufen sind und eindeutig beschrieben werden können, und jenen, die für die Zukunft prognostiziert oder erwartet werden, unterscheiden zu können, wird in diesem Bericht für letztere stattdessen der Begriff Entwicklungsmöglichkeit verwendet.

Wenn dies für ein FEP möglich ist, sind im FEP-Katalog Ausprägungen in Verbindung mit Angaben zu ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit aufgeführt. So können z. B. für das FEP *Rückholbare Kokillen* mit Hilfe der Binomialverteilung bei bekannten Fehlerwahrscheinlichkeiten für die Produktions- und Kontrollmechanismen wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Anzahlen von Behältern mit unerkannten Defekten angegeben werden. Sehr viel höhere oder niedrigere Werte sind als unwahrscheinlich anzusehen.

Bei manchen FEP kann eine Ausprägung angegeben werden, eine Einordnung nach der Wahrscheinlichkeit ist aber nicht möglich. Dies hängt oft damit zusammen, dass die Datenlage für eine solche Einordnung nicht ausreicht. In diesen Fällen wird für das FEP im Referenzszenarium eine repräsentative Ausprägung angegeben. So wird beispielsweise im Referenzszenarium für das FEP *Erdbeben* das Bemessungserdbeben zugrunde gelegt.

Bei einigen FEP hängt deren Ausprägung von der jeweils betrachteten Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems ab. Für solche FEP kann daher a priori keine wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche oder unwahrscheinliche Ausprägung identifiziert werden. Die Ausprägung solcher FEP und die Wahrscheinlichkeit dieser Ausprägung ergeben sich durch die Beeinflussung über andere, kausal mit ihnen verbundene FEP und muss unter den jeweiligen Bedingungen des Szenariums erst ermittelt werden. So wird z. B. die Ausprägung des FEP *Fluiddruck* unter anderem von den Gas- und Lösungsmengen im Grubenbau sowie von der Konvergenz und dem Quellen von Materialien in den Grubenbauen bestimmt. Die tatsächliche Ausprägung bei einer betrachteten Systementwicklungsmöglichkeit kann vorab mittels Modellrechnungen oder durch Expertenurteil mit entsprechender Begründung abgeschätzt oder erst im Rahmen der Konsequenzenanalyse für das Szenarium ermittelt werden.

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

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

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

Die Auswahl der Initial-Barrieren erfolgt, um für die gewählte methodische Vorgehensweise zur Szenarientwicklung die Ansatzpunkte identifizieren zu können. Für das F&E-Vorhaben ANSICHT Referenzprofil NORD wurden die Initial-Barrieren Wirtsgestein, Streckenverschlüsse, Schachtverschlüsse, Bohrlochverschlüsse, Buffer, Innenliner sowie Rückholbare Kokillen festgelegt. Diese Barrieren dienen dazu, den Schadstofftransport durch Begrenzung des advektiven und diffusiven Stofftransportes zu behindern und die Wiederherstellung der geringen Permeabilität in ewG zu gewährleisten, wobei ihre diesbezügliche Barrierenwirksamkeit zu Beginn der Nachverschlussphase vollständig entwickelt ist. Darin unterscheiden sich die Initial-Barrieren von anderen Barrieren (z. B. Versatz), die im Endlagersystem zu einem späteren Zeitpunkt wirksam werden.

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

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

Das **Nahfeld** umfasst alle Einlagerungsbohrlöcher mit allen darin enthaltenen Objekten und Materialien (Nahfelddbarrieren: Rückholbare Kokillen, Sand, Innenliner, Buffer, Außenliner, Bohrlochverschlüsse) inklusive der Auflockerungszone.

Mit **Strecken und Schächte** sind alle bergmännisch geschaffenen Hohlräume und Bohrungen mit allen darin enthaltenen Objekten und Materialien (z. B. Einbauten, Versatz, Verschlussbauwerke) inkl. Auflockerungszone gemeint, sofern sie nicht dem Nahfeld zuzuordnen sind.

Das **Wirtsgestein** umfasst die Schichtenfolge der stratigraphischen Einheiten Hauterivium und Barrêmium abzüglich der bergmännisch geschaffenen Hohlräume und der sie umgebenden Auflockerungszonen.

Das **Nebengebirge** beinhaltet die geologischen Einheiten im Endlagerstandortmodell mit Ausnahme des Wirtsgesteins.

Der **einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG)** ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt (BMU 2010).

3 Methodik der Szenarienentwicklung

Die für das F&E-Vorhaben ANSICHT verwendete Methodik der Szenarienentwicklung baut auf den entsprechenden Ergebnissen des F&E-Vorhabens ISIBEL und der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben auf (Bollingerfehr et al. 2013). In diesen Vorhaben wurde eine Vorgehensweise entwickelt, die es erlaubt, in systematischer Weise eine begrenzte Anzahl von plausiblen Szenarien zu entwickeln, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers relevant sind und mit denen der Ungewissheit bezüglich der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems Rechnung getragen wird, und diese Szenarien in eine Wahrscheinlichkeitsklasse einzustufen (Beuth et al. 2012). Die Basis für die Ableitung der Szenarien bildet der FEP-Katalog. Darin sind für jedes FEP u. a. seine bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit, möglichen Ausprägungen und die direkten Abhängigkeiten (Einwirkung bzw. Beeinflussung) mit anderen FEP ausgewiesen und begründet (Stark et al. 2015).

Eine weitere wichtige Grundlage für die Szenarienentwicklung ist das tonspezifische Sicherheitskonzept (Rübel & Meleshyn 2014). Der Leitgedanke dieses Konzeptes ist es, dass der Einschluss der Radionuklide in einem Endlager im Tonstein durch die Behinderung des Schadstofftransports erfolgt. Diese basiert auf einer Begrenzung des advektiven und diffusiven Transportes und der Wiederherstellung der ursprünglichen geringen Permeabilität im ewG. Gewährleistet werden soll dies durch das Wirtsgestein sowie durch Verschlussbauwerke, die die Wegsamkeiten der Grubenräume abdichten. Die letzteren bilden ein gestaffeltes Barrierensystem, dessen einzelne Elemente zum Teil diversitär und redundant wirken und die sich in ihrer zeitlichen Wirksamkeit ergänzen. Um die Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems umfassend abzubilden, setzt die Szenarienentwicklung an zwei Punkten an, die sich aus diesem Leitgedanken ergeben:

Die Behinderung des Schadstofftransportes wird durch das Wirtsgestein und die geotechnischen Barrieren gewährleistet. Daher dienen die FEP, die die Funktion dieser Initial-Barrieren direkt beeinträchtigen können, als erster Ansatzpunkt für die Ableitung von Szenarien (Initial-FEP).

Neben der Funktion der Barrieren müssen aber auch die Prozesse betrachtet werden, die sich aus der Mobilisierung und dem Transport der Radionuklide ergeben. Deshalb bilden die entsprechenden FEP den zweiten Ansatzpunkt für die Szenarienentwicklung.

Neben den Initial-Barrieren tragen weitere Barrieren zur Rückhaltung der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bei, indem sie zu einem späteren Zeitpunkt eine Freisetzung von kontaminierten Lösungen behindern (z. B. Versatz) oder indem sie die Freisetzung von Radionukliden aus defekten Behältern verzögern (z. B. Abfallmatrix). So müssen die Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“, „Streckenverschlüsse“ und „Bohrlochverschlüsse“ solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden und quellenden Tonversatzes ähnlich groß ist wie der der Verschlussbauwerke. Die zeitlichen Veränderungen der Wirksamkeit dieser weiteren Barrieren sowie eine mögliche Beeinträchtigung ihrer Funktion durch im Endlagersystem ablaufende Prozesse werden durch entsprechende FEP und ihre Ausprägungen und Einwirkungen durch andere FEP berücksichtigt und im Rahmen der Szenarienentwicklung erfasst.

Die Vorgehensweise bei der Szenarienentwicklung im Projekt ANSICHT entspricht weitgehend der VSG-Methodik und ist schematisch in Abb. 3.1 dargestellt. Sie dient der Ableitung eines Referenzszenariums und davon abweichenden Alternativszenarien. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die zu berücksichtigenden Grundlagen, den FEP-Katalog sowie den methodischen Ansatz zur Entwicklung des Referenzszenariums und der Alternativszenarien. In Kap. 3.4 werden die methodische Vorgehensweise bei der Einteilung der Szenarien

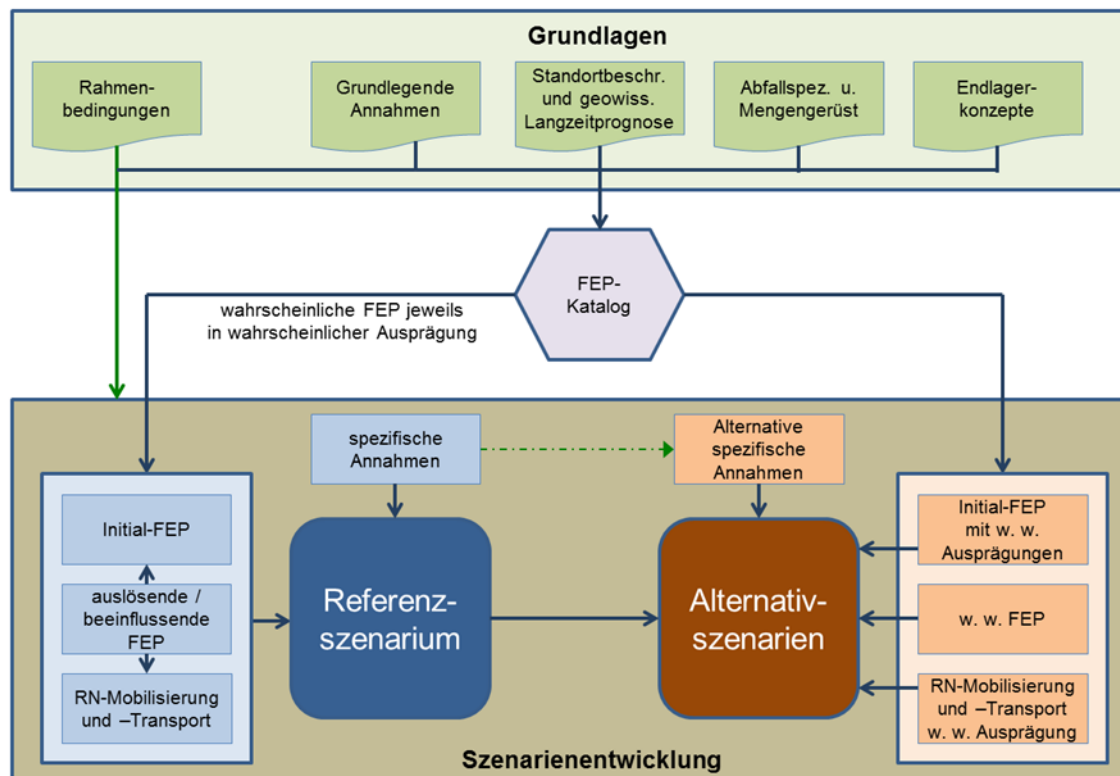


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Elemente der Methodik zur Szenarienentwicklung (Beuth et al. 2012); (w. w. „weniger wahrscheinlich“, RN „Radionuklid“)

rien in Wahrscheinlichkeitsklassen und in Kap. 3.5 die Umsetzung der Szenarien in Rechenefälle dargestellt.

3.1 Grundlagen

Die Szenarienentwicklung und der FEP-Katalog als ihr zentrales Element basieren auf einer Reihe von Grundlagen (Abb. 3.1), die entweder bereits zu Beginn des Projektes ANSICHT vorlagen (z. B. Regelwerk) oder während des Projektablaufes erarbeitet worden sind (z. B. Standortbeschreibung / Geowissenschaftliche Langzeitprognose, Abfallmengengerüst und Endlagerkonzept). Im Folgenden wird auf diese Grundlagen einzeln eingegangen.

3.1.1 Rahmenbedingungen

Zu den Rahmenbedingungen für die Szenarienentwicklung zählen insbesondere die formulierten Anforderungen, Anweisungen und Handlungsoptionen aus den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010).

Zum einen beeinflussen sie Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs, zum anderen ergeben sich aus ihnen auch direkte Vorgaben für die Methodik der Szenarienentwicklung und deren Anwendung. Nachfolgend sind die wesentlichen Aspekte der Sicherheitsanforderungen BMU (2010) mit Bezug zur Szenarienentwicklung und zu den Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems benannt:

Im Kap. 2 "Begriffsdefinitionen und -erläuterungen" der Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) werden für die Szenarienentwicklung und die Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen folgende Vorgaben gemacht:

„Wahrscheinliche Entwicklungen“ sind die für den Standort prognostizierten normalen Entwicklungen und für vergleichbare Standorte oder ähnliche geologische Situationen normalerweise beobachtete Entwicklungen. Dabei ist für die technischen Komponenten des Endlagers die als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften zugrunde zu legen. Falls eine quantitative Angabe zur Eintrittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Entwicklung möglich ist, und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf den Nachweiszeitraum mindestens 10 % beträgt, gilt diese als wahrscheinliche Entwicklung.

„Weniger wahrscheinliche Entwicklungen“ sind solche, die für diesen Standort unter ungünstigen geologischen oder klimatischen Annahmen eintreten können und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen selten aufgetreten sind. Für die technischen Komponenten des Endlagers ist dabei eine als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften bei Eintreten der jeweiligen geologischen Entwicklung zugrunde zu legen. Außerdem sind auch von der normalen Entwicklung abweichende ungünstige Entwicklungsmöglichkeiten der Eigenschaften der technischen Komponenten zu untersuchen. Rückwirkungen auf das geologische Umfeld sind zu betrachten. Abgesehen von diesen Rückwirkungen sind dabei die jeweilig erwarteten geologischen Entwicklungen zu berücksichtigen. Innerhalb einer derartigen Entwicklungsmöglichkeit ist das gleichzeitige Auftreten mehrerer unabhängiger Fehler nicht zu unterstellen. Falls eine quantitative Angabe zur Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Entwicklung oder einer ungünstigen Entwicklung der Eigenschaften einer technischen Komponente möglich ist, sind diese hier zu betrachten, wenn diese Wahrscheinlichkeit bezogen auf den Nachweiszeitraum mindestens 1 % beträgt.

Ergänzend findet sich im Kap. 6 "Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen" unter Punkt 6.4 folgende Festlegung:

„Unwahrscheinliche Entwicklungen“ sind Entwicklungen, deren Eintreten am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet wird und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen nicht beobachtet wurden. Zustände und Entwicklungen für technische Komponenten, die durch zu treffende Maßnahmen praktisch ausgeschlossen werden können, sowie das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten werden den unwahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten zugeordnet.

Weitere Anforderungen finden sich im Kap. 7 "Sicherheitsnachweise"

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre sichergestellt ist (Absatz 7.2.1).

Radiologische Langzeitaussage: Für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen ist nachzuweisen, dass die in den Kap. 6.2 und 6.3 aufgeführten Kriterien eingehalten sind. (Absatz 7.2.2)

Unwahrscheinliche Entwicklungen werden gemäß der Methodik nicht durch Szenarien beschrieben.

Im folgenden Kapitel 3.4 dieses Berichtes wird die Vorgehensweise für die Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen dargestellt.

3.1.2 Grundlegende Annahmen

Bei der Durchführung von Sicherheitsanalysen ist es in vielen Fällen unumgänglich, Vorgaben und Festlegungen zu treffen sowie von bestimmten Voraussetzungen auszugehen, die im Weiteren kurz als "Annahmen" bezeichnet werden. Bei den Annahmen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die einen übergeordneten, grundlegenden Charakter haben und solchen, die aus spezifischen methodischen Vorgehensweisen resultieren (Kapitel 6.1.2).

Das Endlagerstandortmodell Nord ist ein generisches Modell und es besteht eine Vielzahl von Ungewissheiten in Bezug auf die Standortdaten und die modellhafte Vorstellung zum Standort, die erst durch eine zukünftige Erkundung und durch ein gezieltes F&E-Programm reduziert oder beseitigt werden könnten. Für die Durchführung des Projektes ANSICHT wurden daher folgende grundlegende Annahmen getroffen:

Die Geologie des Standortes entspricht dem Endlagerstandortmodell (Reinhold et al. 2013). Das Wirtsgestein hat die geforderten hydraulischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie eine ausreichende Mächtigkeit und Ausdehnung für die Aufnahme aller Einlagerungsbereiche (Jahn & Sönnke 2013, Lommerzheim & Jobmann 2015, Nowak & Maßmann 2013).

Ein "einschlusswirksamer Gebirgsbereich" (ewG) kann ausgewiesen werden.

Für die wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems ist gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) die Integrität des ewG nachzuweisen. Unter "Integrität" wird verstanden, dass die ursprünglichen hydraulischen, mechanischen und hydrochemischen Eigenschaften der Tongesteine über den Nachweiszeitraum erhalten bleiben.

Die Beschreibung der wahrscheinlichen Szenarien basiert zunächst auf der Annahme, dass die Integrität des ewG gegeben ist. Für diesen Fall ist ausgeschlossen, dass:

- sich im ewG sekundäre Wasserwegsamkeiten bilden, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen, und
- dass im ewG vorhandenes Porenwasser am hydrologischen Kreislauf i.S. des Wasserrechts teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im ewG durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.

Der notwendige Nachweis, dass diese Annahme tatsächlich gerechtfertigt war, muss dann jedoch noch geführt werden und erfolgt im Rahmen der systemanalytischen Bewertungen².

3.1.3 Geologische Standortbeschreibung

Eine weitere Grundlagen für die Szenarienentwicklung bildet die geologische Standortbeschreibung, die neben der Beschreibung der derzeitigen Verhältnisse Aussagen zur erwarteten zukünftigen Entwicklung des Modellgebietes (ohne Berücksichtigung des Endlagers und

² Falls der Integritätsnachweis nicht erbracht werden kann, sind die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) zum vereinfachten Nachweis nicht erfüllt. Dann ist das Endlagerkonzept und / oder die Standortwahl zu prüfen. Im Anschluss an eine Änderung des Endlagerkonzeptes ist die Szenarienentwicklung in ihrer Gesamtheit zu wiederholen.

der dadurch verursachten Störung) enthält (Reinhold et al. (2013), Jahn & Sönnke (2013), Nowak & Maßmann (2013)). Die geowissenschaftliche Langzeitprognose (Mrugalla 2014), die gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) für die Ableitung der wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems zu berücksichtigen ist, spielt im Projekt ANSICHT nur eine untergeordnete Rolle, da diese Unterlage nur einen großregionalen Überblick gibt. Die für den fiktiven Endlagerstandort relevanten Entwicklungen finden sich im Endlagerstandortmodell. Die geologische Standortbeschreibung ist auch im Zusammenhang mit der Nachweisführung für die Integrität des ewG über den Nachweiszeitraum heranzuziehen.

Die geologische Standortbeschreibung ist zudem eine Grundlage des FEP-Kataloges und liefert für die Szenarienentwicklung darüber hinaus Hinweise auf die Ausgangssituation und die erwartete Entwicklung derjenigen geologischen Bereiche, die vom Endlager und dem eingebrachten Abfall unberührt bleiben.

3.1.4 Abfallspezifikation und Mengengerüst

Art und Menge der einzulagernden Abfälle sowie deren Charakterisierung hinsichtlich ihrer radiologischen und stofflichen Eigenschaften sind eine wesentliche Grundlage für die Planung von Endlagerkonzepten, den FEP-Katalog, die Szenarienentwicklung und die numerischen Systemanalysen (Lommerzheim & Jobmann 2015, Stark et al. 2015).

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

3.1.5 Endlagerkonzept

Das Endlagerkonzept (Lommerzheim & Jobmann 2015) ist für die Szenarienentwicklung eine wichtige Grundlage, da die Systementwicklung von der Tiefenlage und Anordnung der Einlagerungssohle im Wirtsgestein, der Grubenraumgeometrie sowie dem Einlagerungs- und dem Verschlusskonzept wesentlich beeinflusst wird. Für das Endlagerstandortmodell Nord wird eine rückholbare Bohrlochlagerung in Hauterivium / Barremium-Tonsteinen betrachtet.

3.2 FEP-Katalog

Der FEP-Katalog (Stark et al. 2015) nimmt im Rahmen der Methodik zur Szenarienentwicklung eine zentrale Stellung ein. Er stellt ein Verbindungselement zwischen den Grundlagen und der Szenarienentwicklung dar. Aufbau und Inhalt des FEP-Kataloges orientieren sich an der Methodik zur Szenarienentwicklung und ermöglichen, die für die Szenarien relevanten FEP direkt aus dem Katalog zu selektieren. Das gilt für das Referenzszenarium und teilweise für die Alternativszenarien.

Neben der ausführlichen Beschreibung der FEP hinsichtlich allgemeiner Informationen, Sachlage im Endlagerstandortmodell und standortspezifischer Auswirkungen beinhaltet der Katalog Angaben zur bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit³ sowie Angabe und Begründung

³ Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit kennzeichnet diejenige Wahrscheinlichkeit, mit der ein FEP unter der Bedingung eintritt, dass die für sein Eintreten notwendigen Voraussetzungen am Standort vorliegen bzw. mit Sicherheit zu erwarten sind (Stark et al. 2015).

zur möglichen Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren. Darüber hinaus werden Angaben zur direkten Abhängigkeit von anderen FEP sowie zur Handhabung in den verschiedenen Teilsystemen des Endlagersystems („Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ sowie „Nebengebirge“) gemacht. Die direkten Abhängigkeiten werden in Form von einwirkenden und beeinflussten FEP benannt und begründet. Aus den Angaben des FEP-Kataloges lassen sich darüber hinaus Hinweise zur Ausprägung einzelner FEP ableiten.

3.3 Szenarien

Für das Endlagerstandortmodell Nord wurden ein Referenzszenarium sowie Alternativszenarien entwickelt. In den folgenden Unterkapiteln werden die methodischen Schritte zur Entwicklung der entsprechenden Szenarien aufgezeigt und beschrieben.

3.3.1 Ableitung eines Referenzszenariums

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

Das Referenzszenarium beinhaltet nicht eine einzelne Entwicklungsmöglichkeit, sondern beschreibt eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems.

Das Referenzszenarium folgt aus der

- Berücksichtigung von vorher festgelegten Annahmen, zu denen die in Kap. 3.1.2 genannten grundlegenden Annahmen sowie spezifische Annahmen (Kap. 6.1.2) für das Referenzszenarium gehören, und der
- Berücksichtigung wahrscheinlicher FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren (Initial-FEP) und der FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen.

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

Ein wichtiges Element der Szenarienentwicklung stellen die für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen dar (vgl. Kap. 6.1.2). Die Notwendigkeit, spezifische Annahmen aufzustellen, ergibt sich aus unterschiedlichen Gründen. So weisen die Befunde bzw. die Kenntnisse zu bestimmten Sachverhalten, Gegebenheiten und Umständen Ungewissheiten auf, die sich in manchen Fällen nur schwer bzw., wie z. B. bei der zukünftigen Klimaentwicklung, überhaupt nicht ausräumen lassen. In anderen Fällen ist z. B. der Nachweis über die Erstellbarkeit und Funktionalität von Abschlussbauwerken oder anderen Endlagerkomponenten noch nicht erbracht. Trotz vorhandenen Ungewissheiten und noch nicht geschlossenen Kenntnislücken sind die mit ihnen verbundenen Aspekte in den Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen. Dies geschieht durch die Aufstellung von plausiblen spezifischen Annahmen (Kap. 6.1.2).

In den unterschiedlichen Bereichen des Endlagersystems können die FEP in verschiedener Ausprägung relevant sein. Um die Ausprägung der FEP im Endlagersystem differenzieren zu können, werden die vier Teilsysteme „Nahfeld“, „Wirtsgestein“, „Strecken und Schächte“ sowie „Nebengebirge“ unterschieden (Kap. 2 bzw. Stark et al. 2014).

3.3.1.1 Initial-FEP mit wahrscheinlichen Ausprägungen

Die Initial-FEP sind bereits bei der Erstellung des FEP-Kataloges identifiziert worden und können für die Szenarienentwicklung direkt aus dem FEP-Katalog entnommen werden (Tab. 3.1).

Hinsichtlich der Ableitung der Ausprägung aller zu betrachtenden FEP, die nicht a priori eine Ausprägung aufweisen, sind alle einwirkenden FEP heranzuziehen und zu diskutieren. Bei der Ableitung der Ausprägung der Initial-FEP müssen aus methodischen Gründen beim Referenzszenarium, bei dem es sich um eine wahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeit des Endlagerstandortsystems handelt, alle im FEP-Katalog aufgeführten wahrscheinlichen FEP, die in mindestens einem Teilsystem wirken, berücksichtigt werden.

Bei der Ableitung der Ausprägung der Initial-FEP werden die einwirkenden FEP über mehrere "Ebenen" betrachtet. Unter "Ebenen" werden dabei verschiedene Abhängigkeitsniveaus verstanden. So bilden z. B. alle FEP, die auf das betrachtete FEP A direkt einwirken, die "1. Ebene". FEP, die auf die FEP der 1. Ebene einwirken, werden der "2. Ebene" zugeordnet usw.

Tab. 3.1: Initial-FEP für die Endlagerstandortmodell ANSICHT NORD

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte Initial-Barrieren*
2.1.05.07	Alteration von Verschlussbauwerken	SchV, StrV, BLV, BUF
2.1.07.01	Konvergenz	SchV, StrV, BLV, BUF, IL
2.1.07.02	Fluiddruck	WG, SchV, StrV, BLV, BUF, IL, RK
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	SchV, StrV, BLV, BUF
2.1.07.05	Lageverschiebung von Schachtverschlusselementen	SchV
2.1.09.03	Metallkorrosion	RK, IL
2.1.09.04	Korrosion von Materialien mit Zementphasen	SchV, StrV, BLV
2.1.09.07	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	RK, IL
2.1.09.08	Alteration von Tonmineralen	SchV, StrV, BLV, BUF
2.1.09.09	Alteration von Sonstigen Mineralen	SchV, StrV, BLV, BUF
2.1.10.02	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	SchV, StrV, BLV, BUF
2.1.11.01	Thermische Expansion oder Kontraktion	WG, SchV, StrV, BLV, BUF, IL, RK
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	WG, SchV, StrV, BLV, BUF, IL, RK

* WG „Wirtsgestein“, SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“, BLV „Bohrlochverschluss“, BUF „Buffer“, IL „Innenliner“, RK „Rückholbare Kokille“

Bei der Ableitung der Ausprägung der Initial-FEP werden die einwirkenden FEP der Ebenen 1 bis 3 berücksichtigt. Die Begrenzung auf diese 3 Ebenen ist zulässig, da eine Überprüfung gezeigt hat, dass bei Betrachtung von 3 Ebenen alle wahrscheinlichen und in mindestens einem Teilsystem zu berücksichtigenden FEP des FEP-Katalogs berücksichtigt werden. Bei dieser Überprüfung blieben diejenigen FEP unberücksichtigt, die sich auf die FEP "Radionuklidmobilisierung" und den "Radionuklidtransport" beziehen, da sie über den zweiten Ansatzpunkt bei der Entwicklung von Szenarien berücksichtigt werden.

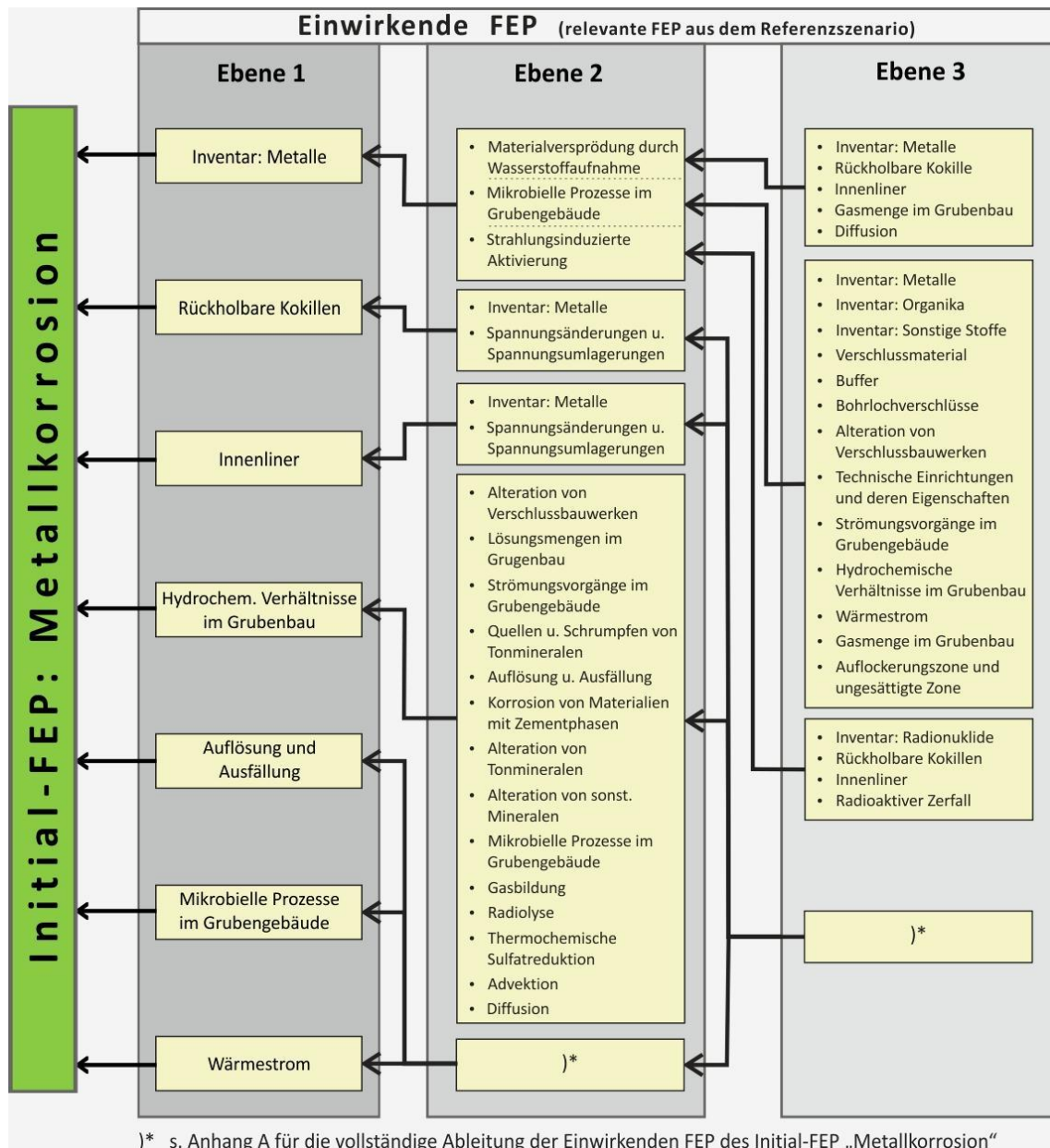


Abb. 3.2: Schematische Darstellung der einzubeziehenden Abhängigkeiten am Beispiel des Initial-FEP *Metallkorrosion*

Die Ableitung der wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP ist in Anlagenband „Einflüsse auf die Ausprägungen“ dokumentiert.

Auf die Prozess-FEP "*Fluiddruck*" und "*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*" wirken in den verschiedenen Teilsystemen unterschiedliche FEP ein, so dass sich lokal verschiedene Ausprägungen ergeben. Daher werden diese FEP für jedes Teilsystem getrennt betrachtet. Quantitative Aussagen zur Ausprägung dieser FEP erfordern Prozessanalysen.

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

3.3.1.2 Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport

Neben den Entwicklungsmöglichkeiten der Initial-Barrieren sind Entwicklungen, die zu einer Radionuklidmobilisierung und zu einem möglicherweise anschließenden Transport von Radionukliden im Endlagersystem führen können, zu betrachten, da sie für die Nachweisführung der Einhaltung geforderter radiologischer Kriterien essenziell sind (vgl. hierzu Kap. 3.3.1 oder BMU (2010)).

Hinsichtlich "*Radionuklidmobilisierung*", "*Radionuklidtransport in der flüssigen Phase*" und "*Radionuklidtransport in der Gasphase*" sind die jeweils möglichen einwirkenden FEP der ersten drei Ebenen aus dem FEP-Katalog abzuleiten und deren Wirkungen zu betrachten. Die Ableitung der Ausprägungen dieser FEP erfolgt in analoger Weise wie für die Initial-FEP in Kapitel 3.3.1.1 beschrieben.

3.3.2 Ableitung von Alternativszenarien

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

Ausgangspunkte für die Ableitung von Alternativszenarien sind (Abb. 3.3):

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

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

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

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

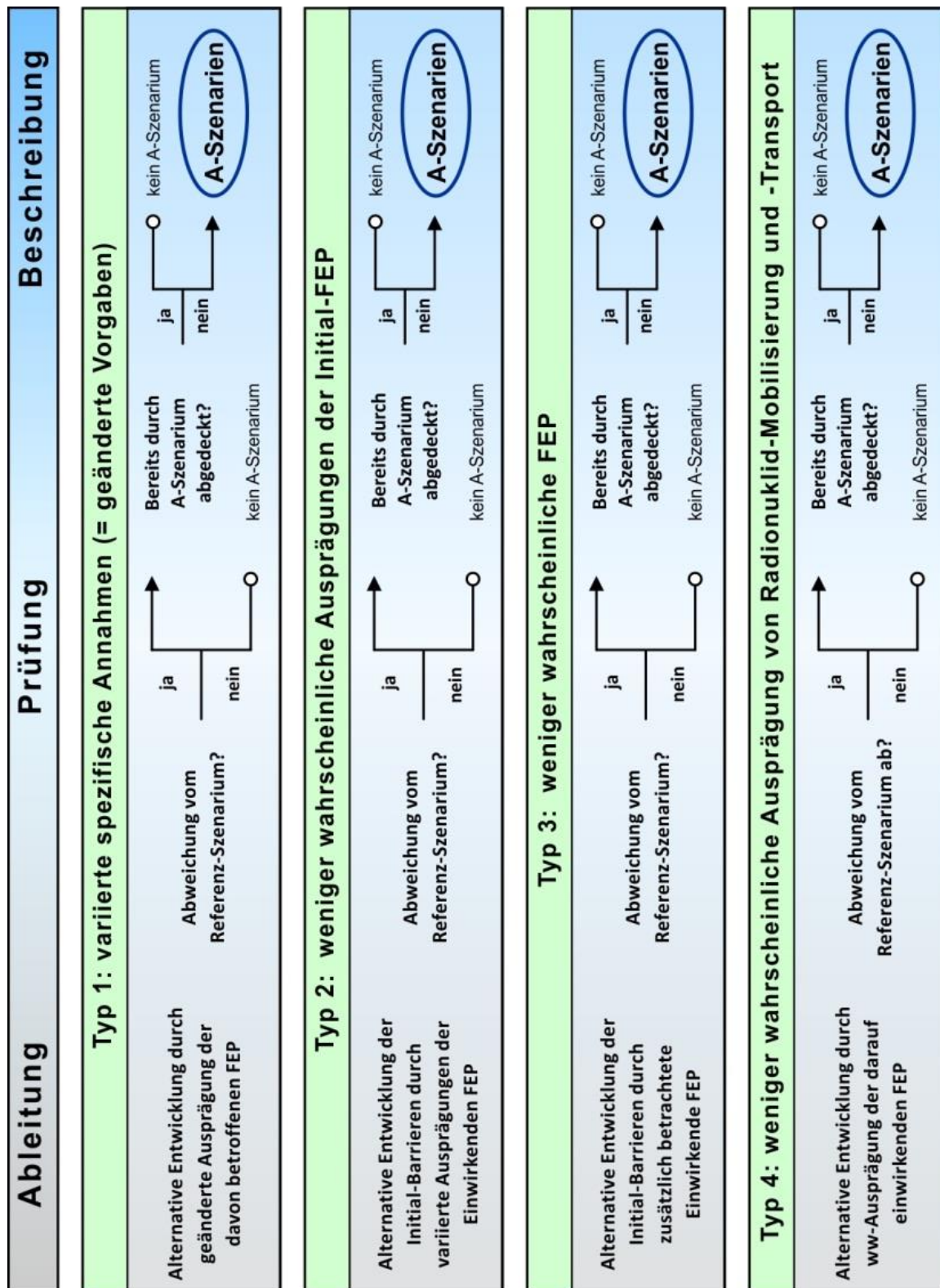


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der Methodik zur Ableitung von Alternativszenarien (= A-Szenarien)

3.3.2.1 Alternativen zu spezifischen Annahmen

Durch Berücksichtigung von Alternativen zu den spezifischen Annahmen für das Referenzszenarium können Alternativszenarien resultieren, z. B. wenn unterstellt wird, dass eine für das Referenzszenarium getroffene spezifische Annahme nicht gilt oder durch eine andersartige Annahme ersetzt wird. Die für die Alternative möglicherweise resultierenden Alternativszenarien sind dann jeweils unter fachlicher Einschätzung in einem Abwägungsprozess in die Wahrscheinlichkeitsklassen „wahrscheinlich“ oder „weniger wahrscheinlich“ einzuordnen (vgl. hierzu auch Kap. 3.4).

Im Gegensatz zu den unter Einbeziehung anderer Ausgangspunkte abzuleitenden Alternativszenarien (Kap. 3.3.2.1.1, 3.3.2.1.2 und 3.3.2.1.3) kann u. U. bei dieser Art von Alternativszenarien die alternative Betrachtung keinen direkten Bezug zu einem FEP des FEP-Kataloges aufweisen.

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

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

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

3.3.2.1.1 Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen

Bei diesem Ausgangspunkt zur Ableitung von Alternativszenarien sind die zu betrachtenden FEP durch die Initial-FEP des Referenzszenariums vorgegeben. Für diese sind in einem ersten Schritt weniger wahrscheinliche Ausprägungen zu identifizieren und zu dokumentieren.

Dazu werden die Initial-FEP (Tab. 3.1) einzeln betrachtet. Für diese FEP werden jeweils die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen festgelegt und die Auswirkungen auf die beeinflussten FEP (Initial-Barrieren) betrachtet. Aus den Ausprägungen der beeinflussten FEP ergeben sich mögliche Abweichungen vom Referenzszenarium. Falls relevante Konsequenzen für die Entwicklung des Endlagersystems auftreten, ist ein Alternativszenarium zu formulieren. Jedes auf diese Weise abgeleitete Alternativszenarium ist aufgrund der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines Initial-FEP als weniger wahrscheinlich einzustufen (Kap. 3.4).

Prinzipiell ergibt sich aus jedem Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen, die nicht vom Referenzszenarium abgedeckt sind, eine zusätzliche abweichende Systementwicklung. Allerdings können andere Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen oder auch weniger wahrscheinlichen FEP mit direkter Auswirkung auf eine Initial-Barriere

ähnliche Auswirkungen auf die Systementwicklung haben wie das betrachtete FEP. In diesem Fall können die – möglicherweise nur geringfügig verschiedenen – Entwicklungsmöglichkeiten zu einem repräsentativen Alternativszenarium zusammengefasst werden.

3.3.2.1.2 Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport

In Analogie zum Referenzszenarium werden nicht nur für die Initial-FEP Ausprägungen abgeleitet, sondern auch für die FEP "Radionuklidmobilisierung", "Radionuklidtransport in der flüssigen Phase" und "Radionuklidtransport in der Gasphase" beschrieben. An Hand der entsprechenden einwirkenden FEP wird überprüft, ob weniger wahrscheinliche Systementwicklungen identifiziert werden können, die noch nicht durch die bereits abgeleiteten Alternativszenarien repräsentiert werden.

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

3.3.2.1.3 Weniger wahrscheinliche FEP

Für die Ableitung von Alternativszenarien können alle erforderlichen Angaben zu den weniger wahrscheinlichen FEP unmittelbar dem FEP-Katalog entnommen werden. Es wurden zwei weniger wahrscheinliche FEP identifiziert, aus denen sich eine direkte Beeinträchtigung einer Initial-Barriere ergibt:

- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (Barriere: Wirtsgestein)
- Kanalisierung in Dichtelementen (Barrieren: Buffer, Bohrlochverschluss, Streckenverschluss, Schachtverschluss)

Das Versagen von Verschlussbauwerken, das in VSG noch durch weniger wahrscheinliche FEP im FEP-Katalog abgebildet wurde (Beuth et al. 2012), wird im Projekt ANSICHT als weniger wahrscheinliche alternative Ausprägung der spezifischen Annahme *"Die Schacht-, Strecken- und Bohrlochverschlüsse sowie die Nahfeldbarrieren und die Behälter werden anforderungsgerecht hergestellt, so dass ihr Versagen durch auslegungsüberschreitende Ereignisse im Referenzszenarium nicht zu betrachten ist"* behandelt.

Für die weitere Betrachtung wird untersucht, in wie weit die Berücksichtigung eines weniger wahrscheinlichen FEP die Systementwicklung des Referenzszenariums beeinflusst. Diese Information ergibt sich aus den beeinflussten FEP des betrachteten FEP. Jedes auf diese Weise abgeleitete Alternativszenarium ist als weniger wahrscheinlich einzustufen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das weniger wahrscheinliche FEP eine wahrscheinliche Ausprägung aufzuweisen hat. Die Verknüpfung eines weniger wahrscheinlichen FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung wird nicht untersucht, da eine derartige Kombination dem Bereich der unwahrscheinlichen Entwicklung zuzuordnen ist.

3.4 Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen

Die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) unterscheiden wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche und unwahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeiten, für die verschiedene Bewertungskriterien gelten (vgl. hierzu Kapitel 3.1.1). Aus diesem Grund müssen die Szenarien in entsprechende Wahrscheinlichkeitsklassen eingeordnet werden. Diese Einordnung erfolgt systematisch auf Basis der Angaben zu den bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der FEP, die im FEP-Katalog (Stark et al. 2015) aufgeführt sind, und ihren jeweiligen Ausprägungen

(vgl. Kap. 2). Entsprechend den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) werden hier nur wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien beschrieben, unwahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeiten werden nicht betrachtet.

Für die Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen werden zunächst die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten aller FEP, die ein Szenarium bestimmen, herangezogen. Diese Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden durch "expert judgement" bestimmt und die Begründung für diese Einschätzung im FEP-Katalog dokumentiert. Als weiteres Kriterium für die Szenarienklassifizierung wurde die Wahrscheinlichkeit der Ausprägung der betrachteten FEP betrachtet (s.o. Kapitel 3.3.1 sowie Anlagenband).

Bei der Szenarienklassifizierung werden nur folgende Wahrscheinlichkeitskombinationen von FEP und Ausprägung betrachtet:

- wahrscheinliches FEP in wahrscheinlicher Ausprägung,
- wahrscheinliches FEP in weniger wahrscheinlicher Ausprägung sowie
- weniger wahrscheinliches FEP in wahrscheinlicher Ausprägung

Alle anderen Wahrscheinlichkeitskombinationen von FEP und Ausprägung führen zu unwahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten, die nicht weiter betrachtet werden. Gleiches gilt für die Kombination von mehreren FEP, die in Bezug auf Eintreten oder Ausprägung weniger wahrscheinlich sind. Die Voraussetzung hierbei ist, dass diese FEP stochastisch unabhängig sind.

Für die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen FEP werden prinzipiell die gleichen quantitativen Kriterien zugrunde gelegt, wie sie für die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen nach den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) gelten. Darin wird ausgesagt, dass

- eine wahrscheinliche Entwicklung vorliegt, wenn die quantifizierbare Wahrscheinlichkeit im Nachweiszeitraum mindestens 10 % beträgt und
- eine weniger wahrscheinliche Entwicklung vorliegt, wenn die quantifizierbare Wahrscheinlichkeit im Nachweiszeitraum mindestens 1 % beträgt.

Daraus wird abgeleitet, dass eine unwahrscheinliche Entwicklung, z. B. durch Kombination zweier (oder mehr) weniger wahrscheinlichen FEP, bei einer Wahrscheinlichkeit kleiner als 1 % vorliegt.

Die Anwendung dieses quantitativen Kriterium ist aber nur in seltenen Fällen möglich (z. B. Anzahl der Behälter oder Verschlussbauwerke mit unerkannten Defekten), da meist die entsprechende Datenbasis nicht vorliegt.

Bei der Ableitung von Alternativszenarien wird immer nur ein (unabhängiges) Merkmal (Eintreten eines FEP oder seine Ausprägung) verändert.

Aus den FEP-Eintrittswahrscheinlichkeiten und den Wahrscheinlichkeiten der Ausprägungen der bestimmenden FEP lässt sich eine Zuordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen vornehmen. Die Abb. 3.4 zeigt für die zu betrachtenden Szenarien die entsprechenden möglichen Wahrscheinlichkeitsklassen.

Bestimmend für die Einordnung des Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse ist das FEP mit der geringsten Wahrscheinlichkeit hinsichtlich bedingtem Eintreten und Ausprägung. Das Referenzszenarium setzt sich ausschließlich aus wahrscheinlichen FEP in ihren wahrscheinlichen Ausprägungen zusammen. Alternativszenarien werden durch die Kombination des Referenzszenariums entweder mit der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines Ini-

tial-FEP oder mit einem weniger wahrscheinlichen FEP charakterisiert. Daher ist eine relativ unkomplizierte Einordnung dieser Szenarien in die Wahrscheinlichkeitsklassen möglich.

Die Alternativszenarien, die sich durch Alternativen zu den spezifischen Annahmen für das Referenzszenarium ergeben, nehmen z. T. eine Sonderstellung ein. Während die Alternative zu den spezifischen Annahmen für die Verschlussbauwerke als weniger wahrscheinliche Ausprägung der Barrieren-FEP betrachtet werden kann, ist eine Verknüpfung mit dem FEP-Katalog für die spezifische Annahme, die die Klimaentwicklung beschreibt nicht möglich. Diese spezifische Annahme kann hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Ausprägung nicht nach dem vorgestellten Ansatz charakterisiert werden. Die Einschätzung, ob es sich um wahrscheinliche oder weniger wahrscheinliche Alternativen handelt, die dann ggf. zur Ableitung von Alternativszenarien führen, ist zu begründen. Resultierende Alternativszenarien können je nach fachlicher Begründung sowohl in die Wahrscheinlichkeitsklasse „wahrscheinlich“ als auch „weniger wahrscheinlich“ eingeordnet werden.

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

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

3.5 Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle

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

Zur Durchführung der Modellrechnungen werden Rechenfälle definiert, die jeweils modellmäßige Abstraktionen der Szenarien mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte darstellen. Dies ist erforderlich, weil in der Regel die beschriebenen Szenarien nicht direkt mit einem Rechenprogramm abgebildet und ausgewertet werden können. Ein Grund kann hierfür sein, dass sich einzelne Prozesse modelltechnisch nicht oder nur eingeschränkt abbilden lassen, z. B. weil der Prozess sehr komplex ist und die notwendigen Rechenprogramme, Werkzeuge

oder Daten für eine Modellierung im notwendigen Detaillierungsgrad nicht zur Verfügung stehen oder weil das Prozessverständnis noch unvollständig ist und somit die Prozessbeschreibung Ungewissheiten aufweist.

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

Die Abb. 3.5 zeigt schematisch die Stationen und Elemente von der Entwicklung der Szenarien, über ihre Abstraktion in Rechenfälle und die Modellierung sowie die analytische Auswertung und Bewertung.

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

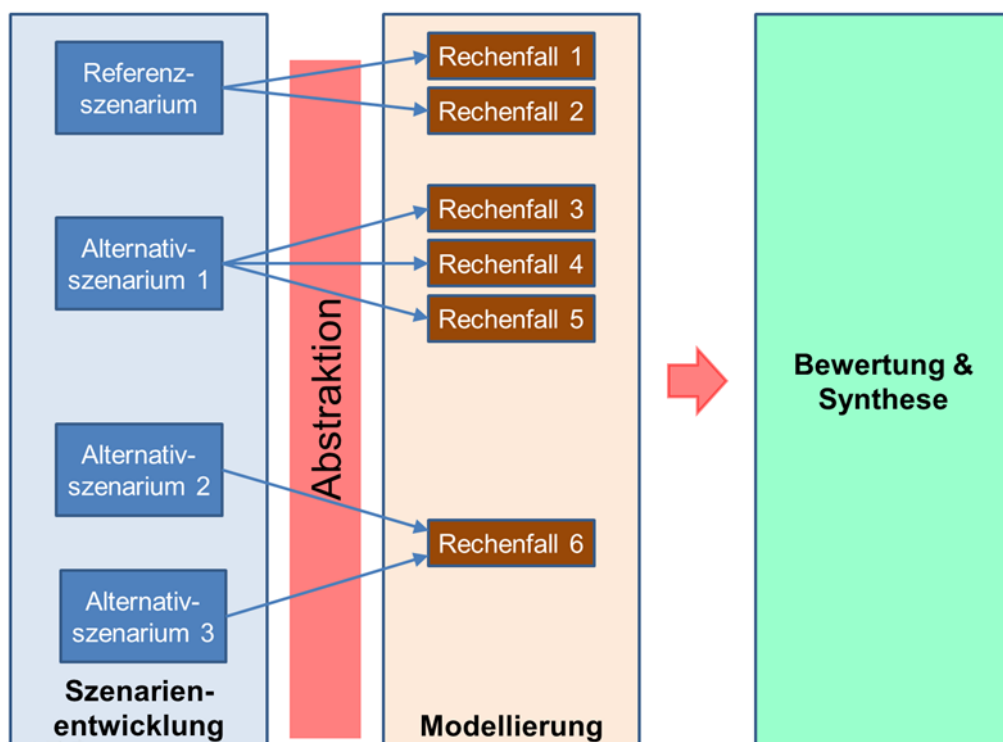


Abb. 3.5: Schematische Darstellung von der Entwicklung von Szenarien bis zur rechentechnischen Auswertung und Synthese der Ergebnisse (Beuth et al. 2012)

4 Ausgangssituation

4.1 Geologie

Entsprechend der Arbeiten von Reinhold et al. (2012) hat das geologische Endlagerstandortmodell NORD eine Fläche von etwa 70 km² sowie eine E-W-Erstreckung von 7 km und eine N-S-Erstreckung von 10 km. Die Werte der topografischen Höhe schwanken zwischen etwa 55 m NN und 85 m NN, wobei die minimalen und maximalen Werte geringfügig darunter bzw. darüber liegen können. Das Gefälle der Oberflächen ist insgesamt nach Norden gerichtet. Die Basis des Endlagerstandortmodells liegt größtenteils in Tiefen unter 4000 m u. NN. Die mehr als 4000 m mächtige Schichtenfolge ist in 17 Modell-Einheiten gegliedert (Abb. 4.1). Die Lagerungsverhältnisse und die Mächtigkeit der Modell-Einheiten resultieren aus der regionalen Subsidenz sowie der Mobilisation von Salzgesteinen des Zechsteins im Gebiet des Referenzprofils NORD (vgl. Reinhold & Sönnke 2012). So besitzen die Basisflächen der Modell-Einheiten Oberer Buntsandstein und Muschelkalk, Keuper, Unterjura sowie Mitteljura gegenüber den Modell-Einheiten aus der Unterkreide ein sehr viel deutlicheres Relief. Klüfte und Störungen, die die Entwicklung des Endlagersystems beeinträchtigen könnten, sind für das generische Endlagerstandortmodell NORD auszuschließen. Für das Endlagerstandortmodell NORD wird eine geringe Hebungstendenz von 0,1 mm/a angenommen.

Die Modell-Einheiten werden als relativ homogen ausgebildete und regional gut charakterisierbare geologische Einheiten definiert. Obwohl durch regionale Fazieswechsel oder aufgrund der Lagerungsverhältnisse eine Variation der Parameterwerte im Gebiet des Referenzprofils NORD im Rahmen natürlicher Schwankungen gegeben ist (vgl. Jahn & Sönnke 2013), werden im Modell die hydraulischen und gesteinsphysikalischen Parameter durch einen Wert für die jeweilige Modell-Einheit repräsentiert (vgl. auch Nowak & Maßmann 2013).

In etwa 900 m u. NN beginnt die Modell-Einheit Valanginium, dessen Ablagerungen den Beginn der marinen, tonigen Unterkreide kennzeichnen. Darüber folgt das Wirtsgestein mit den Modell-Einheiten Hauterivium und Barremium. Diese werden von den tonigen Ablagerungen der Modell-Einheit Aptium überlagert. Die Basis der Modell-Einheit Hauterivium liegt zum größten Teil zwischen 700 m u. NN und 1000 m u. NN, wobei die maximale Tiefe im Südosten des Endlagerstandortmodells auftritt. Die Unterkante der Modell-Einheit Barremium weist Tiefenlagen zwischen 500 m u. NN und 800 m u. NN auf. Auch hier findet sich die maximale Tiefe im Südosten des Modells.

Das Wirtsgestein besteht aus Tonsteinen bis Tonmergelsteinen, die ein plastisches Verformungsverhalten aufweisen. Im Unter-Hauterivium treten untergeordnet auch mikritische Kalkmergelsteinbänke auf und an der Oberkante des Ober-Hauterivium finden sich geringmächtige, schluffige bis feinsandige Bereiche. Ausgehend vom Unter-Hauterivium bis zum Ober-Barremium verringert sich der Karbonatanteil, während der Tonmineralgehalt ansteigt (Jahn & Sönnke 2013). Der Karbonatgehalt der Tongesteine ergibt sich überwiegend aus lagenweise angereicherten Kalkschalen von Mikrofossilien (Foraminiferen und Coccolithen), daneben kommt auch fein aufgearbeiteter Calcit oder Aragonit vor.

Für die Charakterisierung der hydrogeologischen Verhältnisse im Endlagerstandortmodell NORD (vgl. Abb. 4.2) können entsprechend der Salinität der Grundwässer ein oberes, Süßwasser-führendes Grundwasserstockwerk von einem unteren Salzwasser-führenden Grundwasserstockwerk unterschieden werden.

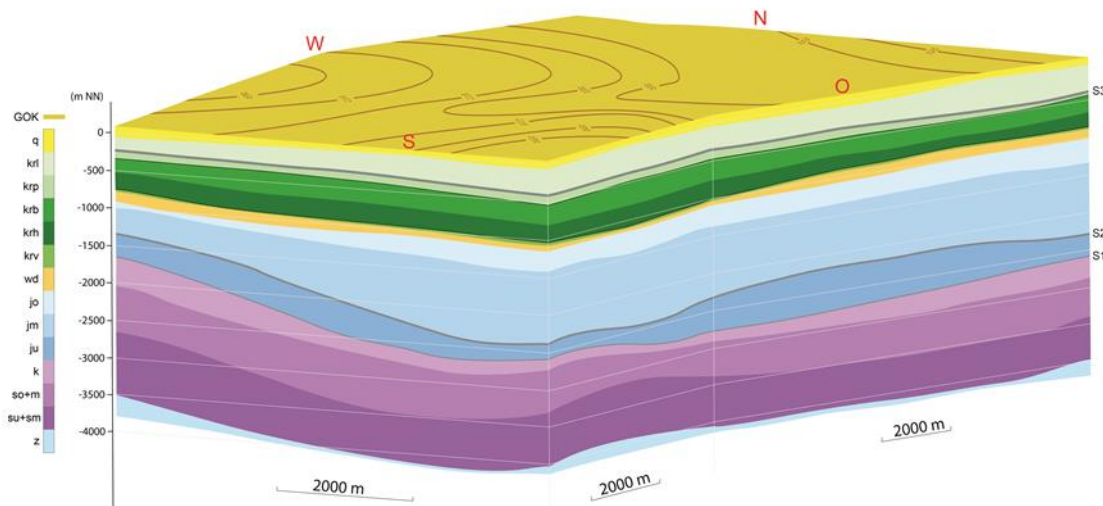


Abb. 4.1: 3D-Blockbild der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD (Abkürzungen: z = Zechstein, su+sm = unterer und mittlerer Buntsandstein, so+m = oberer Buntsandstein und Muschelkalk, k = Keuper, ju = Unterjura, jm = Mitteljura, jo = Oberjura, wd = Wealden, krv = Valanginium, krh = Hauterivium, krb = Barremium, krp = Aptium, krl = Albium, q = Quartär, GOK = Geländeoberkante, S1 = Rhätsandstein, S2 = Aalensandstein, S3 = Hilssandstein)

Das Süßwasser führende Grundwasserstockwerk ist an die Modell-Einheit Quartär gebunden, die im Ganzen gesehen - als ein heterogener Grundwasserkörper mit einem hohen Porenvolumen aufzufassen ist. Dieser Grundwasserleiter ist gekennzeichnet durch quartäre Lockersedimente, die aus einer Wechsellagerung von feinklastischen und gröberklastischen Sedimenten glazialer und fluviatiler Entstehung bestehen. Die flächenhaft verbreiteten unterkreidezeitlichen Tongesteine der Modell-Einheit Albium trennen das Fließsystem der Modell-Einheit Quartär von den tieferen mesozoischen, Salzwasser-führenden Aquiferen. Ein advektiver Austauschprozess zwischen den Grundwasserstockwerken wird für das Endlagerstandortmodell NORD weitestgehend ausgeschlossen.

Die Ton- und Tonmergelsteine des Wirtsgesteins am Endlagerstandortmodell NORD gelten als Grundwassernichtleiter bzw. Grundwassergeringleiter mit einer äußerst geringen Durchlässigkeit. Die unmittelbar im Hangenden und Liegenden an das Wirtsgestein anschließenden Tongesteinsformationen der Unterkreide besitzen nahezu identische hydraulische Eigenschaften wie das Wirtsgestein.

Im Hangenden des Wirtsgesteins tritt ein Salzwasser-führender Grundwassergeringleiter mit einer geringen Durchlässigkeit an der Basis der Modell-Einheit Albium auf. Die Modell-Einheit Hilssandstein ist eine etwa 35 m mächtige, tonig-sandige und diagenetisch verfestigte Schichtenfolge in etwa 200 m Tiefe. Der Chemismus des salinen Wassers wird als Na-Cl-Wasser mit einer hohen HCO_3^- - und SO_4^{2-} -Ionenkonzentration festgelegt. Im Hangenden wird der Aquifer durch die Tongesteine der Modell-Einheit Albium von der Süßwasser-führenden Modell-Einheit Quartär hydrodynamisch getrennt.

Als erster Grundwassergeringleiter im Liegenden des Wirtsgesteins werden die Ablagerungen der Modell-Einheit Wealden mit einer im Vergleich zum Wirtsgestein etwas höheren Durchlässigkeit festgelegt.

Für das Endlagerstandortmodell NORD beträgt der Temperaturgradient 40 K/km und die Temperatur des Gebirges im Niveau der Einlagerungssohle beträgt etwa 36 °C. Insbesondere in den tonigen Schichten sind organische Substanzen charakteristische Nebengemengteile der Tongesteine. Für die besonders bituminösen Schichten der mesozoischen Modell-

Einheiten wird für das Endlagerstandortmodell NORD insgesamt eine kontinuierliche Zunahme des Reifegrads mit der Teufe angenommen. Dementsprechend wird für die bituminösen Posidonienchiefer (Modell-Einheit Unterjura) bei etwa 2000 m u. NN eine Reife angenommen, die zur Ölbildung führen kann.

Modell-Einheit	Lithologische Ausprägung	Durchlässigkeit
Quartär	Sande, Kiese sowie Geschiebelehm und -mergel, Tone, Schluffe	
Albium	Ton- und Mergelstein, zuoberst 25-35 m Flammenmergel	
Hilssandstein	Sandstein	
Aptium	Tonstein, Tonmergel- und Mergelgestein Ober-Aptium: smektitreiche tuftische Lagen Unter-Aptium: lagenweise Blättertone	
Barremium	Ton- und Tonmergelgestein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Hauterivium	Ton- und Tonmergelgestein	
Valanginium	Ton- und Tonmergelgestein	
Wealden	Wechselagerung von Ton- und Sandstein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Oberjura	Kalkstein, lagenweise Anhydrit und Evaporite	
Mitteljura	Ton- und Mergelgestein	
Aalensandstein	Sandstein	
Unterjura	Ton- und Mergelstein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Rhätssandstein	Sandstein	
Keuper	Ton- und Siltgestein, untergeordnet sandige und evaporitische-tonige-dolomitische Lagen	
Muschelkalk + ObererBuntsandstein	Kalk- und Mergelgestein, Salz- und Tongestein	
Mittlerer + Unterer Buntsandstein	Sand- und Tongestein	
Zechstein	Salzgestein	

	Grundwassergeringleiter			Grundwasserleiter			
Durchlässigkeit	äußerst gering	sehr gering	gering	mäßig	mittel	hoch	sehr hoch
Kf-Wert	$\leq 10^{-9}$	$>10^{-9} - 10^{-7}$	$>10^{-7} - 10^{-5}$	$>10^{-5} - 10^{-4}$	$>10^{-4} - 10^{-3}$	$>10^{-3} - 10^{-2}$	$>10^{-2}$
Grenzen (m/s)							

Hydraulische Eigenschaften

Grundwasserleiter
Kf-Wert $> 10^{-3}$
Grundwassergeringleiter
Kf-Wert $> 10^{-10} - 10^{-3}$
Grundwassergeringleiter
Kf-Wert $\leq 10^{-10}$



Abb. 4.2: Schematische Zusammenstellung der hydraulischen Eigenschaften der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD. Klassifizierung in Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter nach Grimmelmann et al. (1997).

4.2 Endlagerkonzept

Abgesehen von den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) bilden die Geologie (Endlagerstandortmodell Nord, vgl. Kap. 4.1), das Abfallmengengerüst (Tab. 4.1), die Ergebnisse thermomechanischer Berechnungen sowie betriebliche Anforderungen die Grundlagen für die Planung des Endlagerkonzepts (Lommerzheim & Jobmann 2015). Die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) wird im Zuge der Integritätsnachweise an Hand von quantitativen Nachweiskriterien belegt (Jobmann et al. 2015)

Tab. 4.1: Abfallmengengerüst. Abfallstrom nach Bollingerfehr et al. (2012). Abfallgebinde ANSICHT-spezifisch. RK-BE = rückholbare Kokille mit Leistungsreaktor-BE, RK-ST = rückholbare Kokille mit kompaktierten Strukturteilen aus der BE-Konditionierung, RK-HA = rückholbare Kokille mit hochradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfällen, RK-WA = rückholbare Kokille mit Wiederaufarbeitungsabfällen. * = wärmeentwickelnde Abfälle, ** = vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle

Abfallstrom				Abfallgebinde
Brennelemente aus Leistungsreaktoren	DWR*	UO ₂	12.450 BE	6.990 RK-BE
		MOX	1.530 BE	
	SWR*	UO ₂	14.350 BE	2.600 RK-BE
		MOX	1.250 BE	
	WWER-DWR*	UO ₂	5.050 BE	1.010 RK-BE
	Strukturteile aus der BE-Konditionierung**			874 RK-ST
Wiederaufarbeitungsabfälle	CSD-V*		3.729 Kokillen	1.865 RK-HA
	CSD-B**		308 Kokillen	103 RK-WA
	CSD-C**		4.104 Kokillen	1.368 RK-WA

4.2.1 Abfallgebinde

Für die Bohrlochlagerung in Tongestein ist eine rückholbare Kokille (RK) vorgesehen, die zur Einhaltung des Temperaturkriteriums (Jobmann et al. 2015) nur mit den Brennstäben von 2 DWR-Brennelementen, 6 SWR-Brennelementen oder 5 WWER-DWR-Brennelementen beladen wird. Außerdem kann die RK 3 Kokillen mit Wiederaufarbeitungsabfällen (CSD-V, CSD-B oder CSD-C) oder kompaktierten Brennelement-Strukturteilen aus der Brennelement-Konditionierung aufnehmen. Der konische Behälterkörper hat eine Länge von 5.060 mm, einen Durchmesser von 520 mm (oben) und 470 mm (unten) und eine max. Gebindemasse von 5.266 kg. Die Wandstärke beträgt 44,5 mm oben und 19,5 mm unten. Der Behälter wird durch ein Doppeldeckeldichtsystem gasdicht verschlossen. Behälterkörper und Deckel be-

stehen aus Feinkornbaustahl 15MnNi6.3 (Werkstoff 1.6210). Der Kopfbereich der Kokille wird durch eine 285 mm starke Platte aus Polyethylen (oder Graphit) abgeschirmt.

4.2.2 Grubengebäude

Entsprechend den – im Vergleich zu den bituminösen Barremium-Tonsteinen – für den Bergbau günstigeren geomechanischen Eigenschaften der kalkigen Hauterivium-Tonsteine soll die Einlagerungssohle in einer Tiefe von ca. 770 m unter GOK angeordnet werden.

Das Endlagerkonzept (Lommerzheim & Jobmann 2015) sieht als Zugang zum Grubengebäude zwei ca. 800 m tiefe Schächte (incl. ca. 20 m Schachtsumpf) vor: einen Schacht für den Gebindetransport und als ausziehender Wetterschacht sowie einen Schacht für die konventionelle Förderung und als einziehender Wetterschacht. Der Abstand zwischen den Schächten und den ersten Einlagerungsstrecken beträgt ca. 300 m. Das Grubengebäude besteht aus einem Infrastrukturbereich in Schachtnähe, an den sich auf der eine Seite ein Einlagerungsbereich für ausgediente Brennelemente (32 Einlagerungsfelder, meist mit je 9 Einlagerungsstrecken) und auf der anderen Seite ein Einlagerungsbereich für Wiederaufarbeitungsabfälle und Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung (12 Einlagerungsfelder, meist mit je 9 Einlagerungsstrecken) anschließt. Verbindungs- und Wetterstrecken zwischen den Einlagerungsbereichen und den Schächten sind in konventionelle und Kontrollbereichsstrecken unterteilt. Der Zugang von den Richtstrecken zu den Einlagerungsfeldern erfolgt über Querschläge. In den Sohlen der Bohrlochüberfahrungsstrecken sind die Einlagerungsbohrlöcher benachbarter Strecken entsprechend einer hexagonalen Anordnung versetzt angeordnet (abwechselnd eine Strecke mit 12 Bohrlöchern und eine Strecke mit 13 Bohrlöchern). Aus betriebssicherheitlichen Gründen wird die Länge der Bohrlochüberfahrungsstrecken auf 400 m begrenzt. Außerdem werden alle Grubenräume mit längerer Offenstandszeit (z. B. Schächte, Infrastrukturbereich, Verbindungs- und Wetterstrecken, Querschläge) durch einen Betonausbau stabilisiert.

4.2.3 Einlagerungskonzept

Die Einlagerungsbohrlöcher haben eine Tiefe von 27 m. In jedes Einlagerungsbohrloch werden drei RKs eingelagert. Die geometrischen Daten der Einlagerungsfelder, die sich aus thermomechanischen Rechnungen und betrieblichen Anforderungen ergeben, sind in Tab. 4.2 zusammengefasst.

Zur Durchführung des Einlagerungsvorgangs sind oberhalb des Bohrlochs in der Bohrlochüberfahrungsstrecke Aufweitungen in der Sohle und in der Streckenfirste erforderlich (Pöhler et al. 2010). In die Einlagerungsbohrlöcher werden zunächst ein perforierter Außenliner aus Stahl und dann - nach dem Auflaufen des Gebirges - Buffer, Innenliner und RKs eingebracht. Der Buffer besteht aus einer 1 m mächtigen Boden- und Kopf-Tonscheibe sowie 30 cm breiten Tonringen, die den lösungsdichten Stahl-Innenliner umschließen (Abb. 4.3). In den Innenliner werden im Wechsel Sand und Kokillen eingebracht. Das System Innenliner-Sand-Rückholbare Kokille ermöglicht eine Rückholung der Behälter in der Betriebsphase und eine Bergung während der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase (vgl. Sicherheitsanforderungen (BMU 2010)).

Das Einlagerungsbohrloch wird durch einen Bohrlochverschluss abgedichtet, der aus einem ca. 5 m mächtigen Ca-Bentonit-Dichtelement und einem ca. 3 m mächtigen Betonwiderlager besteht (Abb. 4.3).

4.2.4 Verfüll- und Verschlusskonzept

Die Hauptbarriere bei Endlagern im Tongestein ist das Wirtsgestein. Bis die Resthohlräume im Grubengebäude durch die Gebirgskonvergenz und das Aufquellen des Versatzes wieder vollständig verschlossen sind, verhindern die geotechnischen Barrieren (Nahfeldbarrieren, Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüsse) einen Lösungszutritt zu den Abfällen bzw. eine Freisetzung kontaminierter Lösungen (Lommerzheim & Jobmann 2015).

Tab. 4.2: Geometrische Daten der Einlagerungsfelder. *) Behälter- und Streckenabstände mechanisch abgeleitet, **) Bohrlochabstände aus betrieblichen Erwägungen

Behälter	Bohrlochlänge (m)	Anzahl Gebinde / Bohrloch	Behälterabstand (m) (Sandschicht)	Streckenabstand (m) (Mitte)	Bohrlochabstand (m)
RK-BE	27	3	0,6	39	45
RK-HA	32	3	1,7	26	30
RK-WA	27	3	0,6*)	26*)	20**)
RK-ST	27	3	0,6*)	26*)	20**)

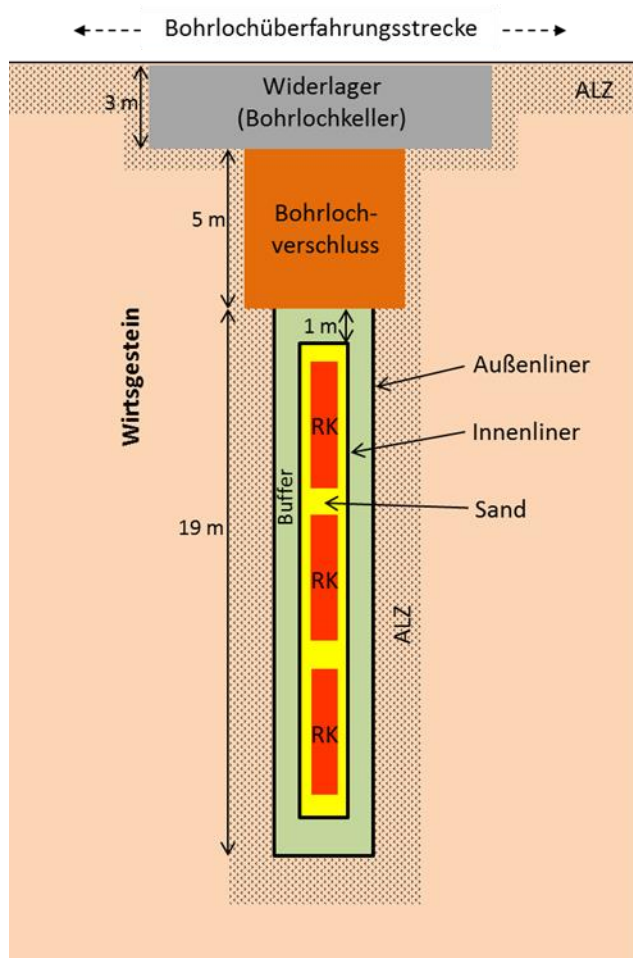


Abb. 4.3: Schematische Darstellung eines Einlagerungsbohrloches mit den Nahfeldbarrieren

Die Rückholbaren Kokillen (Einschluss des Radionuklidinventars) und die Innenliner (mechanischer Schutz der Rückholbaren Kokille) werden so ausgelegt, dass sie die Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) an eine Rückholung während der Betriebsphase und eine Bergbarkeit der Abfallgebinde während der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase erfüllen.

Eine wesentliche Aufgabe des Buffers ist die Verzögerung einer Lösungsbewegung zu und von den Innenlinern und, nach deren Ausfall, den Behältern zur Verzögerung der Metallkorrosion. Die Verzögerung der Lösungsbewegung entsteht durch eine langsame Aufsättigung des Buffers und einer Verringerung der Permeabilität durch dessen Quelldruckentwicklung. Darüber hinaus soll er, speziell in der frühen Nachverschlussphase, eine Rückhaltewirkung gegenüber freigesetzten Radionukliden besitzen bis sich die Auflockerungszone am Rand der Bohrlöcher wieder geschlossen hat. Außerdem hat der Buffer eine Widerlagerfunktion für den Bohrlochverschluss. Die vorgesehene Funktionsdauer beträgt 50.000 a.

Die hohen Temperaturen ($> 150^{\circ}\text{C}$ aufgrund der wärmeentwickelnden Abfälle) in der Sandverfüllung des Innenliners werden in der frühen Nachverschlussphase mikrobielle Aktivitäten in diesem Bereich verhindern (Sterilisierung).

Der Bohrlochverschluss besteht aus einem 5 m starken Bentonit-Dichteelement und einem 3 m starken Betonwiderlager. Er dichtet einerseits die Auflockerungszonen des Bohrlochs und im Sohlenbereich der Bohrlochüberfahrungsstrecke sowie andererseits das Bohrloch selbst gegen Lösungszutritt und -freisetzung ab. Außerdem soll er eine Rückhaltefunktion für freigesetzte Radionuklide besitzen. Die vorgesehene Funktionsdauer beträgt 50.000 a.

Der tonige Versatz in den Bohrlochüberfahrungsstrecken, in den Querschlägen und in den Richtstrecken dient einerseits der geomechanischen Stabilisierung der Grubenräume und andererseits langfristig der Abdichtung der Strecken. Langfristig soll das Versatzmaterial durch Quellen und Kompaktion ähnliche hydraulische Eigenschaften wie die Verschlussbauwerke annehmen. Die Aufsättigung der ungesättigten Gebirgszone um die Grubenräume und des Versatzes muss noch durch Prozessanalysen ermittelt werden. Hier wird zunächst ein Zeitraum von mehreren 1.000 Jahren unterstellt. Die Gebirgskonvergenz kann erst nach einem Versagen des Streckenausbaus zur Kompaktion des Versatzes beitragen.

Da die Strecken in der frühen Nachverschlussphase durch unvollständig kompaktierten Versatz mit Firstspalte und die Auflockerungszone noch eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit haben, wird die Abdichtung unmittelbar nach dem Verschluss des Endlagers durch Streckenverschlüsse gewährleistet. Sie verzögern bzw. begrenzen einerseits einen Zutritt von Lösungen zu den Einlagerungsbereichen und andererseits eine Freisetzung ggf. kontaminierter Lösungen aus den Einlagerungsbereichen in das Grubengebäude. Einfache Verschlüsse werden in den Querschlägen der Einlagerungsfelder errichtet. Große, redundante Streckenverschlüsse in den Richtstrecken werden kurz vor dem Infrastrukturbereich angeordnet. Entsprechend den Ungewissheiten für die Entwicklung der hydraulischen Eigenschaften des Streckenversatzes wurde für die Streckenverschlüsse zunächst eine Funktionsdauer von 50.000 Jahre festgelegt.

Im Grundkonzept bestehen die Streckenverschlüsse aus Ca-Bentonit-Dichteelementen, die beidseitig durch Widerlager aus Beton (Portland-Zement) stabilisiert werden (Abb. 4.4). Als zusätzliche Redundanz ist stützender Versatz (Bentonit-Sand-Gemisch) vorgesehen, der nach der Korrosion der Betonwiderlager die Dichtelemente in ihrer Position halten soll. Vor der Errichtung einer Barriere werden der Streckenausbau, alle Einbauten und Teile der Auflockerungszone an der Einbaulokation entfernt, um eine direkte Anbindung der Barriere an das Gebirge zu erreichen. Die Streckenverschlüsse werden mit tongefüllten Schlitzen (0,3 m breit, bis 3 m tief) in der Hohlraumkontur kombiniert (Abb. 4.4), um mögliche Wegsamkeiten in der Auflockerungszone abzudichten.

Im Infrastrukturbereich ist ein Speichervolumen für die Gase (vor allem aus der Metallkorrosion) und andere Fluide vorgesehen.

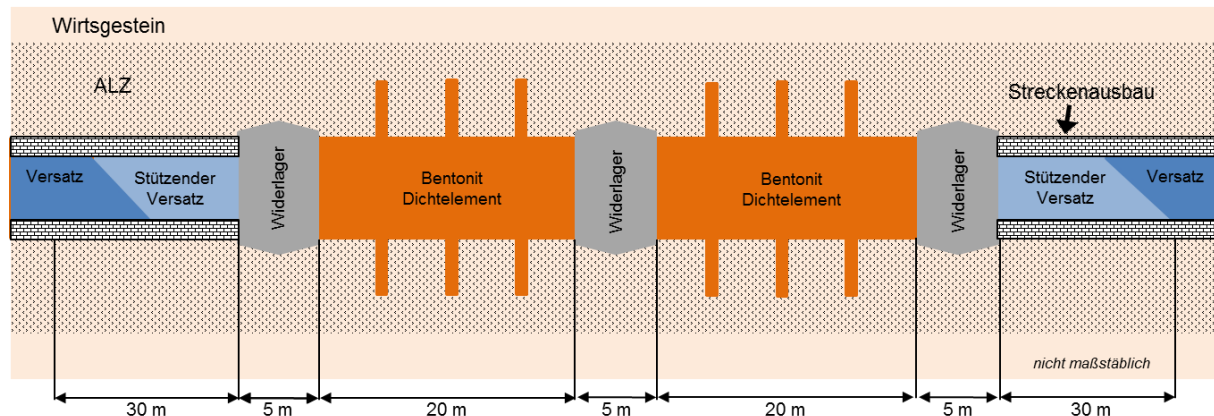


Abb. 4.4: Streckenverschlusskonzept in Anlehnung an das Konzept von ANDRA (2005)

Der Zugang zur Erdoberfläche wird durch Schachtverschlüsse abgedichtet. In dem parallel laufenden Verbundvorhaben ELSA-Phase-II werden Schachtverschlusskonzepte für Endlager in Tonsteinformationen in Deutschland entwickelt und im Sinne einer ingenieurtechnischen Vorbemessung exemplarisch ausgelegt. Es war angedacht, Synergieeffekte zu nutzen und die F&E-Vorhaben ANSICHT und ELSA-Phase-II zu verknüpfen. Basierend auf den Endlagerstandortmodellen und den lithologischen Schachtprofilen, die in ANSICHT für die Modellregionen NORD und SÜD erarbeitet wurden, werden im Rahmen von ELSA-Phase-II Schachtverschlusskonzepte entwickelt. Diese Konzepte sollten dann umgekehrt soweit wie möglich als Referenzkonzepte für die Schachtverschlüsse in das ANSICHT Vorhaben genutzt werden. Aus zeitlichen Gründen konnte für das Endlagerstandortmodell NORD nicht auf die Verschlussentwicklung in ELSA-Phase-II gewartet werden, da sich sonst die Entwicklung von Szenarien zu sehr verzögert hätte. Aus diesem Grunde wurde ein Vorentwurf (Abb. 4.5) für den Schachtverschluss NORD entwickelt, auf dessen Basis die Entwicklung von Referenz- und Alternativszenarien exemplarisch durchgeführt und illustriert werden konnte. In Lommerzheim & Jobmann (2015) ist der zur Zeit der Berichtslegung aktuelle Entwicklungsstand des Schachtverschlusses im F&E-Vorhaben ELSA-Phase-II zur Information beschrieben. Weitere Details sind in Herold et al. (2016) beschrieben.

Im vorgesehenen Niveau der Schachtverschlüsselemente werden die Schachtausbauten und der Hauptteil der Auflockerungszone entfernt, um den direkten Kontakt zwischen dem Gebirge und den Dichtelementen sowie die effektive Einspannung der Verschlusswiderlager zu ermöglichen. Im Bereich des Wirtsgesteins und des tonigen Nebengebirges bestehen die Schachtverschlüsse aus Bentonit-Dichtelementen und Betonwiderlagern, die entsprechend den geologischen Verhältnissen angeordnet werden (Abb. 4.5). Die Materialwahl orientiert sich an den aktuellen hydrochemischen Verhältnissen sowie den erwarteten alterierten Lösungen. Die Schachtverschlüsse gliedern sich in die unteren Verschlüsse an der Grenze Hauterivium / Barremium und die oberen Verschlüsse, die den Hilssandstein und – durch eine hydrostatische Asphalt-Dichtung – die Grenze zum wasserführenden Quartär abdichten. Der restliche Schacht wird zur mechanischen Stabilisierung der Schachtsäule mit Ausbruchmaterial verfüllt. Analog zu den Streckenverschlüssen sollen die Schachtverschlüsse bereits unmittelbar nach Verschluss des Endlagers ihre Dichtfunktion erfüllen. Die Langzeitstabilität der Barrierenmaterialien hängt von den hydrochemischen Verhältnissen im Nebengebirge ab. Diese werden durch zukünftige Klimaentwicklungen beeinflusst. Nur bis zum Höhepunkt der nächsten Kaltzeit in ca. 50.000 a ist eine Prognose der hydrochemischen Verhältnisse im Nebengebirge möglich. Daher entspricht dies der maximal nachweisbaren Funktionsdauer.

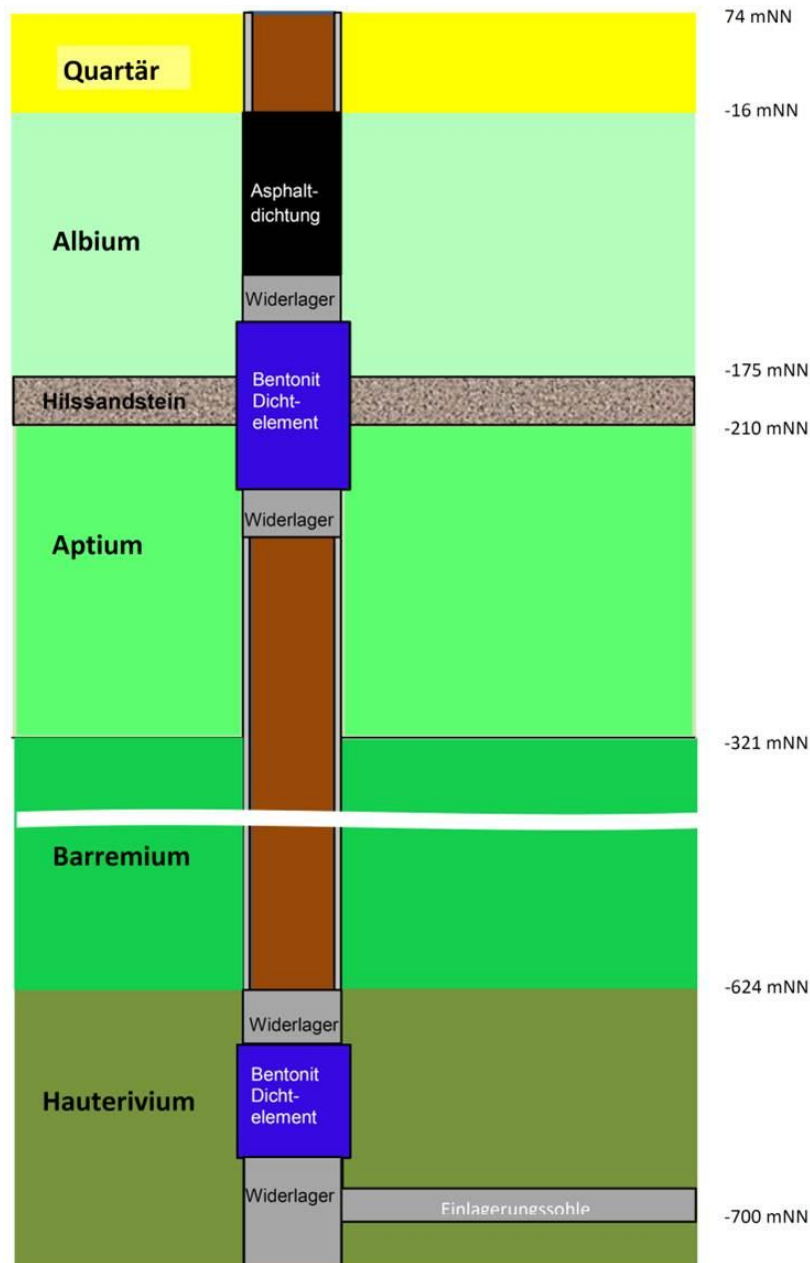


Abb. 4.5: Vorentwurf für einen Schachtverschluss (schematisch). Teufenangaben in mNN (Lommerzheim & Jobmann 2015).

5 Die zeitlich veränderliche Ausprägung systemrelevanter FEP

Viele Prozesse und die durch sie beeinflussten Zustände sind nicht nur in verschiedenen Endlagerbereichen unterschiedlich ausgeprägt, sondern sie ändern sich auch über die Zeit. Dies betrifft auch Aspekte der Systementwicklung, die nicht unmittelbar, sondern mittelbar über höhere Abhängigkeitsebenen auf die Initialbarrieren oder die FEP Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport einwirken. Diese Abhängigkeiten werden auch in der Szenarienbeschreibung dargestellt, wobei der Schwerpunkt dort aber auf der räumlich unterschiedlichen Ausprägung der FEP liegt.

Zur Verbesserung des Verständnisses der zeitlichen Systementwicklung sollen daher im Folgenden die zeitlich veränderlichen Ausprägungen einiger systemrelevanter (= wichtig für die zukünftige Systementwicklung) FEP beispielhaft dargestellt werden. Für die Komponentenauslegung und für die Ableitung von Nachweiskonzepten ist z. B. eine erste orientierende zeitliche Zuordnung der Relevanz bestimmter Prozesse und Zustände von Vorteil.

Zeitlich veränderliche, systemrelevante Zustände der Endlagersystementwicklung können exemplarisch mit Hilfe der Initial-FEP sowie den FEP Radionuklidmobilisierung und -transport abgeleitet werden. Dabei wurden auch die Erfahrungen und Ergebnisse der Sicherheitsnachweise für andere Endlagerprojekte in Ton (Schweiz (Nagra 2002), Belgien (Ondraf-Niras 2001, Wickham 2008), Frankreich (Andra 2005)) berücksichtigt. Bei den ausgewählten FEP handelt es sich um die technischen Komponenten des ANSICHT-Sicherheitskonzeptes (Verschlussbauwerke, Versatz und Behälter) bzw. damit verknüpfte Eigenschaften/Komponenten (z. B. *Auflockerungszone*, *Streckenausbau*) und Prozesse (*Wärmestrom*, *Strömungsvorgänge*). Die Strömungsvorgänge sind wesentlich für den Radionuklidtransport. Weiterhin werden klimatische Einwirkungen betrachtet.

Von den dargestellten Aspekten kann die Mehrzahl hinsichtlich ihrer zeitlichen Beschränkung nicht exakt vorhergesagt werden. Daher beinhaltet die Abb. 5.1 auch nur zwei orientierende Zeitmarken bei 500 und bei 50.000 Jahren, die mit der Funktionsdauer für die Endlagerbehälter und die Verschlussbauwerke sowie mit der zunehmenden Möglichkeit einsetzender kaltzeitlicher Klimaänderungen zusammenfällt. Eine weitere Angabe von Zeitmarken bzw. eine Zeitskala würde eine Genauigkeit vorgeben, die aufgrund bestehender Ungewissheiten hinsichtlich des Ablaufes einzelner Aspekte nicht gegeben ist. Für diese Aspekte lassen sich jedoch einschätzende zeitliche Einordnungen in Phasen oder Abschnitte bezüglich ihres Wirkens bzw. Eintretens in der Nachverschlussphase angeben.

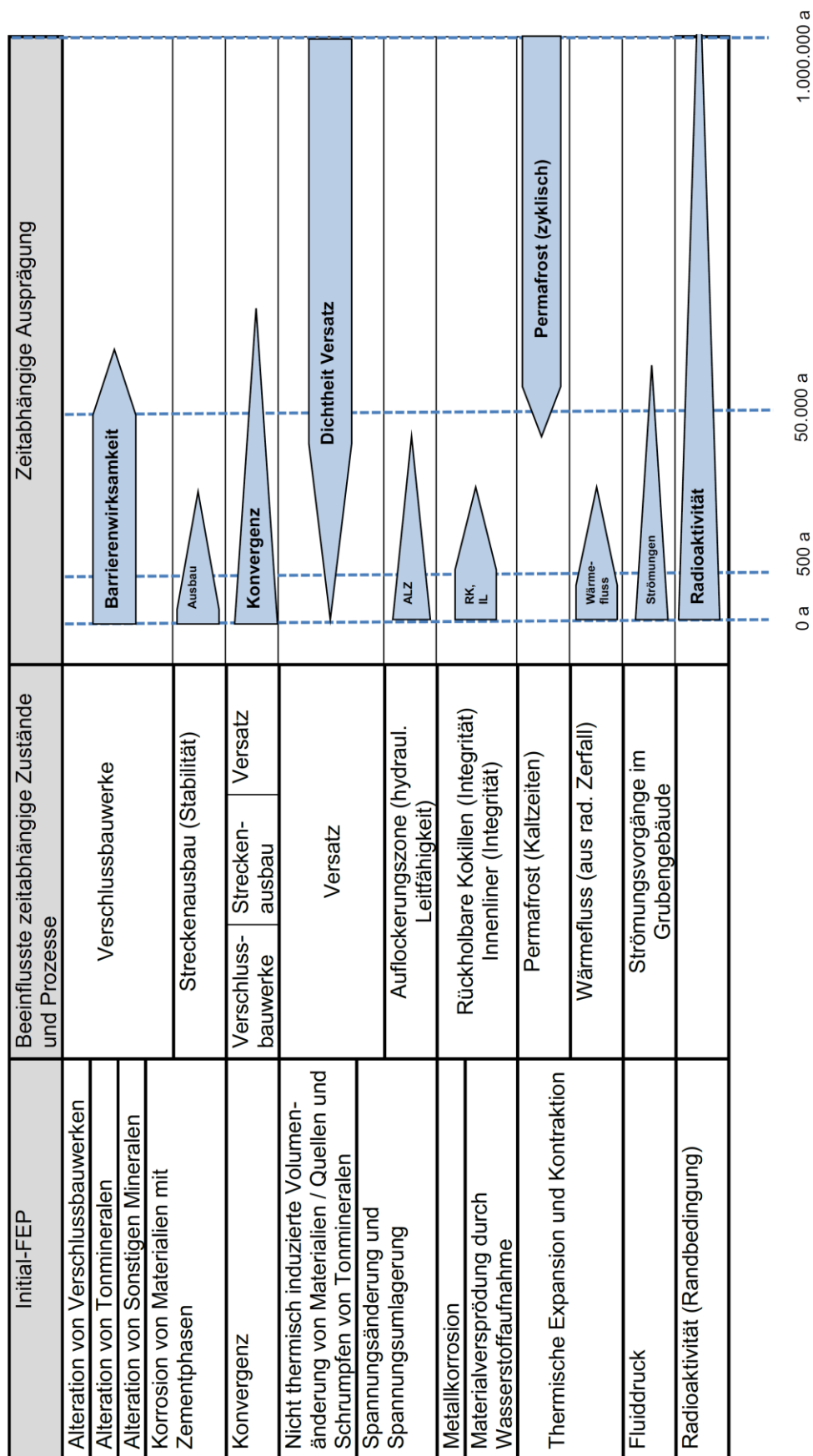


Abb. 5.1: Beispiele für die zeitlich veränderliche Ausprägung systemrelevanter FEP und ihre Verknüpfung mit den Initial-FEP.

Für das Referenzszenarium wird eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren für Buffer, Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüsse zugrunde gelegt. Die Initial-FEP *Alteration von Verschlussbauwerken*, *Alteration von Tonmineralen*, *Alteration von sonstigen Mineralen* und *Korrosion von Materialien mit Zementphasen* wirken sich alle auf den Stoffbestand und die **Barrierenwirksamkeit** (mechanische, hydraulische und chemische Eigenschaften) aus. In Bezug auf die Schachtverschlüsse ist nach dieser Funktionsdauer aufgrund zukünftiger Kaltzeiten eine Beeinträchtigung der oberen Teile der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen. Auch eine Beeinträchtigung der Funktion der anderen Dichtelemente durch Korrosion ist infolge des sich dann langsam ändernden Chemismus der Lösungen möglich. Die Annahme derselben Funktionsdauer für die anderen Verschlussbauwerke wird vor allem mit den Ungewissheiten begründet, die bezüglich der Entwicklung des Versatzes bestehen, der langfristig die Dichtfunktion der Barrieren übernehmen soll (Lommerzheim & Jobmann 2015). Für alle Verschlussysteme ist nach der Funktionsdauer von einer sukzessiven Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit auszugehen.

Wichtig für die Entwicklung der hydraulischen Eigenschaften des Grubengebäudes ist die Entwicklung des **Streckenausbau**. Sobald dieser durch eine *Korrosion von Materialien mit Zementphasen* versagt, kann die *Konvergenz* auf den *Versatz* auflaufen, die möglicherweise vorhandene Firstspalte schließen und zur Kompaktion des Versatzes beitragen. Es wird davon ausgegangen, dass der Streckenausbau in der frühen Nachverschlussphase versagen wird. Noch unklar sind hydraulischen Eigenschaften des korrodierten Streckenausbau.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (incl. *Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen*) sowie Spannungsdifferenzen zwischen Gebirge und **Versatz** können die *Versatzkompaktion* beeinflussen. So lange der Streckenausbau noch intakt ist, wird das Verdichten des Versatzes vor allem durch das Quellen des Tons im Versatz hervorgerufen werden. Die Aufsättigung des Versatzmaterials durch zutretende Lösungen hängt von der Mächtigkeit der ungesättigten Zone um die Grubenbaue (und deren Wiederaufsättigung) ab. Die mechanische Versatzkompaktion kann erst nach einem Versagen des Streckenausbau erfolgen. Durch die genannten Prozesse wird sich die Ursprungsporosität des Versatzes von 25 – 30 % kontinuierlich verringern. Es wird erwartet, dass der Versatz nach einigen 1.000 bis wenigen 10.000 Jahren ähnliche hydraulische Eigenschaften aufweisen wird wie die Verschlussbauwerke (Lommerzheim & Jobmann 2015).

Mit der Auffahrung von Grubenbauen entsteht durch die Spannungsumverteilung im Gebirge ein mechanisch geschädigter Gebirgsbereich an der Hohlraumkontur (**Auflockerungszone, ALZ**). Die ALZ ist eine wichtige, potenzielle, hydraulische Wegsamkeit während der Nachverschlussphase. Mit zunehmendem Stützdruck der Grubenraumverfüllung werden sich die Spannungsdifferenzen zwischen Wirtsgestein und Auflockerungszone kontinuierlich reduzieren. Infolge dessen werden sich auch die Risse in der Auflockerungszone wieder schließen und die hydraulische Leitfähigkeit wird sinken. Es wird erwartet, dass dieser Prozess in einigen 1000 bis wenigen 10.000 a abgeschlossen sein wird.

Die aus der Spannungsumverteilung im Gebirge resultierende *Konvergenz* wirkt sich auf alle Streckeneinbauten (**Verschlussbauwerke, Streckenausbau, Versatz**) aus. Da sie zur Einspannung dieser Komponenten im Gebirge beiträgt, ist sie wichtig für die Funktionalität der Barrieren. In den anderen Teilen des Grubengebäudes verhindert der Streckenausbau ein frühzeitiges Auflaufen der Konvergenz auf den Versatz. Dies ist erst nach Versagen des Streckenausbau möglich. Anschließend trägt die Konvergenz zur Verdichtung und damit zur Funktionalität des Versatzes bei. Die Konvergenz wird so lange ablaufen, wie Hohlräume vorhanden sind und eine Spannungsdifferenz zwischen dem Gebirge und der Verfüllung des Grubengebäudes besteht. Dies wird in den verschiedenen Bereichen des Grubengebäudes zu unterschiedlichen Zeiten der Fall sein. Es wird aber erwartet, dass der Konvergenzprozess während Funktionsdauer der Barrieren weitgehend abgeschlossen sein wird. Zu späte-

ren Zeiten kann eine Konvergenz in geringem Umfang durch neugeschaffene Hohlräume z. B. durch die Alteration von Baustoffen auftreten.

Die Endlagerbehälter (**Rückholbare Kokillen**) und die für die Rückholbarkeit erforderlichen **Innenliner** werden entsprechend den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) für eine Funktionsdauer von 500 Jahren ausgelegt. So wird für diese Zeit durch den Behälter das Abfallinventar eingeschlossen und eine Freisetzung radioaktiver Aerosole verhindert. Zudem wird die mechanische Integrität des Behälters soweit erhalten bleiben, dass eine Bergung möglich ist. Die Auslegung muss daher sowohl *Einwirkungen der Metallkorrosion wie auch der Materialversprödung* durch Wasserstoffaufnahme abdecken. Nach Ablauf der vorgesehenen Funktionsdauer ist ein Versagen der Rückholbaren Kokillen und Innenliner durch chemische und/oder mechanische Einwirkungen nicht auszuschließen. Insgesamt ist davon auszugehen, dass mit der Zeit die Anzahl der defekten Endlagerbehälter sukzessive zunimmt. Über die Anzahl dieser Behälter und mögliche Häufungspunkte für ein Versagen entlang des Zeitstrahles können keine Aussagen gemacht werden.

Zu den Prozessen, die erst zu einem späteren Zeitpunkt in der Nachverschlussphase einsetzen, gehören kaltzeitliche Entwicklungen (z. B. **Permafrost**). Ein kontinuierlicher Permafrost könnte sich ab ca. 50.000 Jahre nach heute bis zum Maximum der nächsten Kaltzeit entwickeln, wobei Unterbrechungen während wärmerer Zeitabschnitte möglich sind. Für das Referenzszenarium wurde ein Klimabild vorgegeben (Kap. 6.1.1), nach dem in der Nachverschlussphase von zehn Kaltzeiten - unterbrochen von entsprechenden Warmzeiten - auszugehen ist. Das heißt, dass sich im Prinzip zu jeder dieser Kaltzeiten am Standort Permafrost entwickeln kann. Diesen Sachverhalt gibt Abb. 5.1 bewusst nicht wieder, da in der Abbildung ausgedrückt werden sollte, wann mit einer Möglichkeit des ersten Einsetzens von Prozessen zu einem späteren Zeitpunkt in der Nachverschlussphase zu rechnen ist. Da der Höhepunkt der nächsten Kaltzeit erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Verschlussbauwerke erreicht wird, sind mögliche Beeinträchtigungen der Funktion der Schachtverschlüsse durch Permafrost oder andere kaltzeitliche Einwirkungen (z. B. Rinnenbildungen) sicherheitstechnisch von untergeordneter Bedeutung. Die klimabedingte Abkühlung des Wirtsgesteins wird aufgrund der Tiefenlage nur wenige Grad betragen, so dass nicht zu erwarten ist, dass die Funktion des ewG durch thermisch bedingte Kontraktionen beeinträchtigt wird.

Wesentlich stärkere thermomechanische Spannungen werden sich im Nahfeld aus der Wärmeproduktion der eingelagerten radioaktiven Abfälle ergeben (**Wärmestrom aus radioaktivem Zerfall**). Aus dem Radionuklidinventar der eingelagerten Abfälle lässt sich berechnen, dass sich die Temperatur nach einigen tausend Jahren wieder dem Ausgangszustand annähern wird.

Der *Fluiddruck* ist Antriebsmotor für die **Strömungsvorgänge im Grubengebäude**. Er wird durch Lösungen aus dem Wirtsgestein, Abfällen und Baustoffen, die Grubenluft sowie durch Gasbildung infolge Metallkorrosion, Zersetzung von Organika und Radiolyse bestimmt. Es wird erwartet, dass die Wiederaufsättigung des Grubengebäudes sowie die Prozesse der Gasbildung in wenigen 1.000 Jahren abgeschlossen sein werden, so dass sich dann auf der Einlagerungssohle ein Druckausgleich einstellen wird. Da sich gleichzeitig Resthohlräume im Grubengebäude schließen und die hydraulische Leitfähigkeit von Verschlussbauwerken, Versatz und Auflockerungszone abnimmt, werden sich die Strömungsvorgänge im Grubengebäude immer mehr reduzieren.

Das mit den Abfällen eingebrachte Radionuklidinventar stellt eine gut bekannte Randbedingung für das Endlager dar. Durch den Zerfall der eingebrachten Radionuklide wird – in Abhängigkeit von den Halbwertszeiten – die **Radioaktivität** im Endlager kontinuierlich abnehmen.

6 Referenzszenario

In den folgenden Kapiteln wird jeweils das Referenzszenario als die Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems für das Endlagerstandortmodell NORD an Hand der Initial-FEP entsprechend ihrer im Anlagenband abgeleiteten Ausprägung beschrieben. Dabei wird auf die Beschreibung der Ausgangssituation (vgl. Kap. 4.1 Geologie und 4.2 Endlagerkonzept) aufgesetzt. Die Beschreibung der Ausprägung der Initial-FEP konzentriert sich auf die ersten beiden Abhängigkeitsebenen. Wichtige FEP der dritten Ebene werden nur erwähnt und bezüglich der Ausprägung auf den FEP-Katalog verwiesen. Eine Auswertung der Abhängigkeiten hat gezeigt, dass bei diesem Ableitungsprozess alle wahrscheinlichen FEP des FEP-Kataloges wenigstens einmal erwähnt werden (siehe hierzu auch Kap. 3.3.1). Hieraus ist allerdings noch nicht abzuleiten, dass auf den ersten 3 Abhängigkeitsebenen bereits für alle Kausalketten die relevanten FEP enthalten sind. Die Betrachtung einiger Prozesse und Zustände, die nach Erfahrungen in anderen Sicherheitsnachweisen für die Systementwicklung eines Endlagers in Ton bedeutsam sind (vgl. auch Kap. 5), zeigt, dass dies nicht in jedem Fall gegeben ist. Die entsprechenden Informationen sind allerdings im FEP-Katalog enthalten. Entsprechende Hinweise werden in die Szenarienentwicklung aufgenommen.

Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit wird die Beschreibung des Endlagersystems unter Einbeziehung der vier im FEP-Katalog ausgewiesenen Endlagerteilsysteme „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ sowie „Nebengebirge“ in vier Kapitel untergliedert. Für jedes Teilsystem werden für die Entwicklung des Endlagersystems relevante Prozesse vom Ausgangszustand bis in eine Million Jahre beschrieben (vgl. Kap. 5). Dabei berücksichtigt die Beschreibung des Referenzszenariums jeweils die Einwirkdauer oder das Einsetzen der Wirkung der FEP.

Neben den Entwicklungsmöglichkeiten, die sich aus den Initial-FEP ergeben, sind auch solche Entwicklungsmöglichkeiten zu betrachten, die zu einer Radionuklidmobilisierung und zu einem daraus möglicherweise resultierenden Transport von Radionukliden führen (Kapitel 3.3.1). Dies wird in die Beschreibung der Teilsysteme integriert.

Bei der Beschreibung des Referenzszenariums wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit bis auf wenige Ausnahmen bewusst auf die Angabe von Referenzen verzichtet, da die Grundlage für die Ableitung von Szenarien der FEP-Katalog ist, der zu jedem FEP eine Vielzahl von Referenzen und weiteren Literaturquellen vorhält. Darüber hinaus sind im Anlagenband, in dem die Ableitung der Ausprägung von Initial-FEP dokumentiert ist, die wesentlichen bezugnehmenden Referenzen benannt.

6.1 Randbedingungen

6.1.1 Klimabild

Im FEP-Katalog NORD sind zahlreiche geologische Prozesse enthalten, die eine Abhängigkeit von der klimatischen Entwicklung am Standort aufweisen. Beschrieben wird diese Entwicklung für Norddeutschland im FEP *Globale klimatische Veränderungen* (Stark et al. 2015) und im Bericht zur geowissenschaftlichen Langzeitprognose (Mrugalla 2014).

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

Der entsprechend der Annahme verwendete 100.000-Jahre-Zyklus korreliert auch mit den Milanković-Zyklen, in denen eine aus verschiedenen Parametern berechnete Schwankungskurve der Sonneneinstrahlungsstärke wiedergegeben ist. Für die Klimaentwicklung bedeutet der Zyklus, dass die durchschnittliche Dauer einer Kalt- mit dazugehöriger Warmzeit 100.000 Jahre beträgt. Dieser generelle Trend enthält jedoch noch keine Aussagen darüber, in welcher Intensität die Klimaentwicklung in der Zukunft ablaufen wird. Um bei der Szenarienentwicklung eine Abschätzung der wahrscheinlichen Entwicklung der klimaabhängigen geologischen Prozesse vornehmen zu können, wurde für die Zukunft ein Klimabild entworfen, das auf der vergangenen Entwicklung beruht und einen repräsentativen Rahmen für diese Abschätzungen liefert (Abb. 6.1). Die Datenbasis für diese Darstellung ist die in Lüthi et al. (2008) veröffentlichte Klimakurve, die aus Eiskerndaten der DOME-C-Bohrung aus der Antarktis gewonnen wurde. Ein Vergleich mit stratigraphischen und paläoklimatischen Einstufungen in Norddeutschland weist tendenziell gute Korrelationen auf (vgl. „Zitat LZP Nord“). Daher wurde für das Endlagermodell Nord ein Klimabild erstellt, dass an die Alterseinstufungen von Litt et al. (2007) für Norddeutschland und Heunisch et al. (2007) für Niedersachsen angelehnt ist. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere die zeitliche Einstufung der stratigraphischen Einheiten mit zunehmendem Alter der Schichten aufgrund von nicht flächendeckend vorhandenem oder schwer datierbarem Material der Schichten Ungewissheiten aufweist. Zusätzlich erfolgte eine leichte Anpassung an den Verlauf der Klimakurve aus der DOME-C-Bohrung.

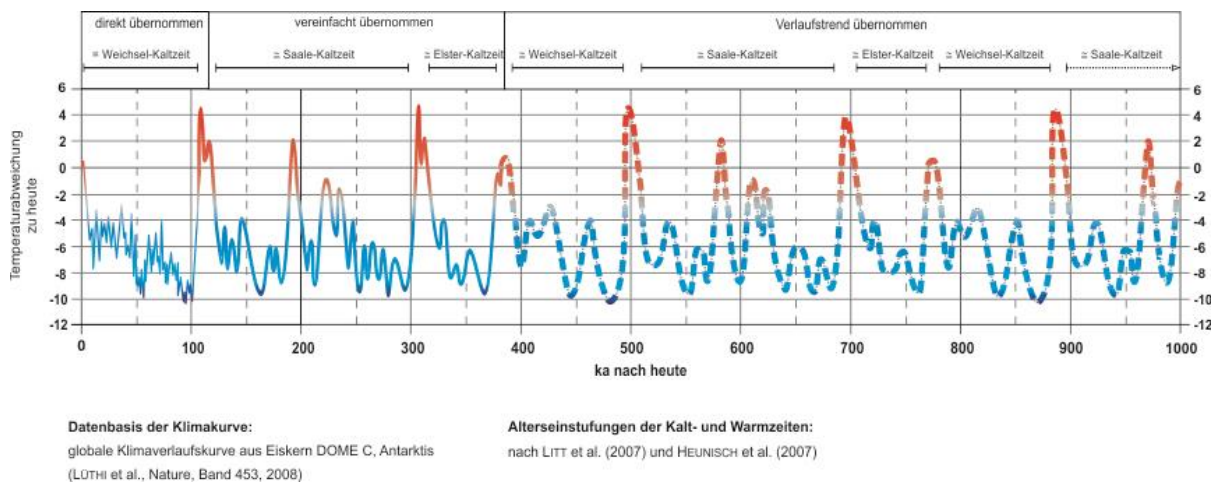


Abb. 6.1: Das Klimabild für das Referenzszenarium

Entsprechend der dort angegebenen Alter wurde aus der DOME-C-Klimakurve der Bereich, der die Weichsel-, Saale- und Elster-Zeit abdeckt, ausgeschnitten. Der für die Weichsel-Zeit übernommene Bereich umfasst demnach einen Zeitabschnitt von ca. 115.000 Jahren und beinhaltet auch die 11.600 Jahre, die zur Holozän-Warmzeit gehören. In den Ausschnitt der Saale-Kaltzeit ist die Eem-Warmzeit eingegliedert. Beide zusammen decken einen Bereich von ca. 190.000 Jahren ab. Insgesamt umfasst die Saale-Kaltzeit auch ohne die Eem-Warmzeit mehrere Kalt- und Warmphasen und ist daher als Komplex anzusehen. Die Elster-Kaltzeit weist schließlich inklusive der Holstein-Warmzeit eine Gesamtdauer von ungefähr 83.000 Jahren auf. Damit beträgt die Dauer der betrachteten Abfolge von Kalt- und Warmzeiten, wie in den stratigraphischen Einteilungen für Norddeutschland und Niedersachsen zu entnehmen, insgesamt etwas weniger als 400.000 Jahre.

Bei der Zusammenstellung des Klimabildes (Abb. 6.1) wurde im ersten Abschnitt, aufgrund einer Modellierung von Forsström (1999), die als nächste Kaltzeit eine der Weichsel-Kaltzeit ähnliche ergab, der Verlauf der Weichsel-Kaltzeit direkt in die Zukunft übertragen. Darauf folgen erneut Entwicklungen, wie sie für die Saale- und die Elster-Abfolgen beschrieben werden. Da für diesen Zeitabschnitt keine geeigneten Modellrechnungen vorliegen, wurde

der Klimaverlauf dort vereinfacht dargestellt. Eine weitere Vereinfachung, die lediglich einen generellen Verlaufstrend wiedergibt, wurde für die Zeit im Anschluss daran bis zum Ende des Nachweiszeitraums in einer Million Jahre gewählt. Auch dort folgen wieder Entwicklungen wie die Weichsel-, die Saale- und die Elster-Klimaabfolge aufeinander. Entsprechend dem 100.000-Jahre-Zyklus sind im Klimabild innerhalb des Nachweiszeitraumes zehn Kalt- und Warmzeiten enthalten, deren Ausprägungen für damit gekoppelte Prozesse (z. B. Permafrost oder Rinnenbildung) ungefähr abgeschätzt werden können.

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

Die Tab. 6.1 fasst die Merkmale zusammen, die den drei Kaltzeittypen für das Referenzszenarium zugrunde gelegt werden. Weitere Erläuterungen zu diesen Merkmalen werden in den nachfolgenden Abschnitten von Kap. 6 geliefert.

Die Einschätzung der genannten Eismächtigkeit für die älteren Kaltzeiten lehnt sich an Ergebnissen aus in der Literatur vorliegenden Modellrechnungen, die auch in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose erläutert werden (Mrugalla 2014) und den Informationen zum FEP-Katalog (Stark et al. 2015) an. Eine Unterscheidung zwischen einer wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen zukünftigen Inlandeisentwicklung wird aufgrund der hohen Ungewissheiten und der widersprüchlichen Angaben in der Literatur nicht vorgenommen.

Tab. 6.1: Zusammenstellung von orientierenden Kenndaten für die drei im Endlagerstandortmodell Nord zu betrachtenden Kaltzeittypen

Kaltzeitmerkmal	Weichsel	Saale	Elster
Inlandvereisung	eisfrei (Standortmodell nicht überfahren)	vollständig (Standortmodell vom Inlandeis überfahren)	vollständig (Standortmodell vom Inlandeis überfahren)
Eismächtigkeit	0 m	bis 500 m*	bis 500 m**
maximale Temperaturabweichung zu heute	bis -10 °C	bis -10 °C	bis -10 °C
Permafrost	Tiefenwirkung: 150 m – 200 m möglich	Tiefenwirkung: 150 m – 200 m Rückgang des Permafrostes (Abhängig von Dauer der Inlandvereisung und Eismächtigkeit)	Tiefenwirkung: 150 m – 200 m Rückgang des Permafrostes (Abhängig von Dauer der Inlandvereisung und Eismächtigkeit)
Rinnenbildung	nein (aufgrund der Entfernung des Inlandeises zum Referenzprofil)	möglich (verglichen mit Elster-Kaltzeit weniger ausgeprägt)	möglich (liegt im Referenzprofil vor) 100 m im Lockergestein und 50 m im Festgestein
Eisvorschubrate	-	mehrere Hundert m/a im Randbereich	(mehrere Hundert m/a im Randbereich)**

* Die Angabe ist aus Aseev (1968) entnommen.

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

Der in Tab. 6.1 genannte Wert von 500 m Inlandeismächtigkeit wird für die Zwecke der Szenarienentwicklung als repräsentative Ausprägung angesehen.

Einige Überlegungen zur Mächtigkeit des jüngeren Saalegletschers sind in Aseev (1968), Aseev (1974), Aseev (1978) und darauf basierend in Feldmann (2002, Abb. 37), s. a. sowie in einer Modellierung von Lambeck et al. (2006) veröffentlicht. Die in Feldmann (2002), Kaltwang (1992) und Bernhard (1963) diskutierten Werte und Modellierungen stellen jedoch nur Annäherungen an die tatsächlichen Verhältnisse in dieser Zeit dar.

Ergänzende Überlegungen zur Ausbildung des Weichsel-Gletschers, z. B. von Lambeck et al. (2010), Svensk Karnbranslehantering AB (SKB) (2010), Siegert & Dowdeswell (2004), Forsström et al. (2003), Forsström (1999) und Boulton et al. (1985), führen zu Eismächtigkeiten, die in einem Abstand von ca. 150 bis 200 km vom Inlandeisrand um Werte von 1.000 m schwanken.

6.1.2 Spezifische Annahmen

Gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept soll gewährleistet werden, dass die Gesamtheit der in der Szenarienentwicklung abgeleiteten Szenarien die Ungewissheiten in der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems abdeckt. Die spezifischen Annahmen, die für das Referenzszenarium getroffen worden sind, tragen zur Erreichung dieser Zielsetzung bei. Sie dienen im Wesentlichen dazu, den Prozess der Szenarienentwicklung zu gliedern und das Referenzszenarium sinnvoll von den Alternativszenarien abgrenzen zu können. Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen stellen dann einen Ausgangspunkt für die Ableitung von Alternativszenarien dar.

Die für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen beeinflussen die in diesem Szenarium abgeleitete Entwicklung des Endlagersystems wesentlich. Die Notwendigkeit, spezifische Annahmen aufzustellen, ergibt sich aus unterschiedlichen Gründen.

So weisen die Befunde bzw. Kenntnisse zu bestimmten Sachverhalten und Umständen, wie z. B. zur zukünftigen Klimaentwicklung, Ungewissheiten auf, die sich nur schwer bzw. überhaupt nicht ausräumen lassen.

Außerdem liegen der Auslegung der geotechnischen Verschlussbauwerke begründete Annahmen zu möglichen Lastfällen zugrunde, die im Rahmen einer Vorbemessung aus der erwarteten zukünftigen Systementwicklung abgeleitet werden. Die Bandbreite der möglichen zukünftigen Systementwicklungen hängt andererseits aber z. T. von der Auslegung der geotechnischen Komponenten ab. Für das Referenzszenario wird daher unterstellt, dass die Verschlussbauwerke so ausgelegt und errichtet sind, dass sie bei der erwarteten Systementwicklung (Referenzszenario) ihre Funktion über die vorgesehene Funktionsdauer erfüllen. Aufgrund von Fehlerquoten in der industriellen Fertigung und bei den Kontrollmaßnahmen schließt die wahrscheinliche Ausprägung technischer Komponenten bei einer hohen Anzahl von Komponenten auch die Errichtung / Einlagerung einer geringen Anzahl von Komponenten mit unerkannten Defekten ein.

Weiterhin sind Annahmen für die Anordnung des Grubengebäudes in der geologischen Situation am Standort zu treffen, die u. a. darauf beruhen, zu bestimmten Gesteinsschichten (Sandlinsen, pyritreichen Schichten, Kluftzonen) einen Sicherheitsabstand einzuhalten. Weiterhin ist ein Sicherheitsabstand zu den Schächten und zu Erkundungsbohrungen einzuhalten.

Im Prinzip könnten die bei den spezifischen Annahmen beschriebenen Aspekte auch mit im Referenzszenarium betrachtet werden, z. B. über Aufnahme zusätzlicher FEP in den FEP-

Katalog oder durch Fallunterscheidungen. Die Beschreibung des Referenzszenariums würde dadurch aber unübersichtlich und schwerer nachvollziehbar. Aus diesem Grund ist es praktikabler, diese Aspekte in Form von Alternativszenarien aus dem Referenzszenarium auszugliedern.

Folgende spezifische Annahmen gelten für das Referenzszenarium:

- Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Saale und Elster entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps Elster ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen.
- Die Schacht-, Strecken- und Bohrlochverschlüsse, der Buffer sowie Innenliner und Behälter werden anforderungsgerecht hergestellt, so dass – abgesehen von Komponentenfehlern durch die Fehlerquoten in den Fertigungsverfahren - zukünftige Einwirkungen im Zuge der Referenzentwicklung nicht zu einem Versagen führen.
- Die Korrosion des Streckenausbaus führt nicht zu langfristig wirksamen hydraulischen Wegsamkeiten.
- Die hydraulischen Eigenschaften des Versatzes werden sich während der Funktionsdauer der Verschlussbauwerke durch Kompaktion so weit ändern, dass die Ausbreitung von Schadstoffen durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse ist.
- Es liegen keine unerkannten geologischen Merkmale oder Bohrungseigenschaften vor, durch die die Integrität der geologischen Barriere oder der Bohrungsabdichtungen in Frage gestellt werden könnte.

6.2 Beschreibung des Referenzszenarios

6.2.1 Teilsystem „Nahfeld“

Das Einlagerungskonzept ist in beiden Endlagerflügeln für die unterschiedlichen Abfallarten gleich. Für die Entwicklung des Endlagersystems ist es aber relevant, dass es neben den Einlagerungsbereichen mit wärmeentwickelnden Abfällen Einlagerungsbereiche mit CSD-C, CSD-B und Strukturteilen gibt, die sich durch niedrigere Temperaturen, eine entsprechend andere Ausprägung aller temperaturbeeinflussten Prozesse sowie durch abweichende Stoffinventare auszeichnen.

In Tab. 6.2 sind die gemäß dem FEP-Katalog im Nahfeld zu berücksichtigenden Initial-FEP und die FEP zur Radionuklidmobilisierung und dem -transport zusammengestellt. In den nachfolgenden Beschreibungen wird auf diese FEP Bezug genommen, dabei werden auch wichtige beeinflussende FEP genannt. Die Reihenfolge der diskutierten FEP orientiert sich an sachlichen Zusammenhängen und nicht an der Reihenfolge in der Tabelle (diese ergibt sich aus der Reihenfolge im FEP-Katalog).

Die sich im Nahfeld befindenden Initial-Barrieren sind die Rückholbaren Kokillen, die Innenliner, die Buffer und die Bohrlochverschlüsse. Entsprechend den spezifischen Annahmen wird für das Referenzszenarium unterstellt, dass diese Initialbarrieren während der vorgesehenen Funktionsdauer nicht durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen versagen werden.

Die *Rückholbaren Kokillen* und die *Innenliner* haben jeweils eine Funktionsdauer von 500 Jahren. Gemäß den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) verhindern die Behälter für diesen Zeitraum eine Freisetzung von Radionukliden. Danach gibt es an beide Barrieren keine sicherheitsrelevanten Anforderungen mehr. Ähnliches gilt für den *Buffer* und den *Bohrlochverschluss*. Diese beiden Barrieren haben eine Funktionsdauer von 50 000 Jahren. Nach der

jeweiligen Funktionsdauer der Barrieren wirken die in Tab. 6.2 angegebenen Initial-FEP weiter auf die Barrieren ein, so dass diese zunehmend von ihren anfänglich spezifizierten Eigenschaften abweichen und ihre Funktion nicht mehr vollumfänglich erfüllen werden.

Tab. 6.2: Zu berücksichtigende FEP im Teilsystem Nahfeld

Initial-FEP	Beeinträchtigte Initial-Barrieren
Alteration von Verschlussbauwerken	Buffer, Bohrlochverschlüsse
Konvergenz	Bohrlochverschlüsse
Fluiddruck	Rückholbare Kokille, Innenliner, Buffer, Bohrlochverschlüsse
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Rückholbare Kokille, Innenliner, Bohrlochverschlüsse
Metallkorrosion	Rückholbare Kokille, Innenliner
Korrosion von Materialien mit Zementphasen	Bohrlochverschlüsse
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Rückholbare Kokille, Innenliner
Alteration von Tonmineralen	Buffer, Bohrlochverschlüsse
Alteration von sonstigen Mineralen	Buffer, Bohrlochverschlüsse
Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	Buffer, Bohrlochverschlüsse
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Rückholbare Kokille, Innenliner, Buffer, Bohrlochverschlüsse
FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport	
Radionuklid-Mobilisierung	
Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	
Radionuklidtransport in der Gasphase	

Auf Grund der großen Anzahl der vier genannten technischen und geotechnischen Nahfeld-Barrieren ist davon auszugehen, dass eine geringe Anzahl der Initial-Barrieren bereits bei der Einbringung unerkannte Fertigungsfehler aufweisen werden. Dies kann dazu führen, dass die betroffenen Initial-Barrieren ihre sicherheitsrelevanten Funktionen auch während ihrer Funktionsdauer nicht vollumfänglich erfüllen. Entsprechend den Fehlerquoten in großtechnischen Fertigungs- und Kontrollverfahren ist für den Innenliner und den Buffer von einer Fehlerquote von 10^{-4} und für die Rückholbare Kokille und den Bohrlochverschluss von 10^{-3} auszugehen. Die mittels Binomialverteilung abgeschätzte Anzahl von Initial-Barrieren mit unerkannten initialen Defekten beträgt damit 23 Rückholbare Kokillen, 10 Innenliner, 3 Buffer und 8 Bohrlochverschlüsse (siehe FEP der entsprechenden Initial-Barrieren). Art, Intensität und Auswirkung des jeweiligen Defekts können nicht spezifiziert werden. Das vorzeitige Versagen von Rückholbaren Kokillen führt zu einer Freisetzung von volatilen Radionukliden.

Der *Innenliner* und die *Rückholbare Kokille* bilden gemeinsam ein System, das die Bergbarkeit und den Einschluss der Radionuklide im Behälter für 500 Jahre sicherstellen soll. Die **Metallkorrosion** kann diese beiden Initial-Barrieren beeinträchtigen. Die Ausprägung der Korrosionsprozesse hängt vor allem von den *hydrochemischen Verhältnissen* und der Menge der Lösung, der Temperatur (*Wärmestrom*) sowie dem Material und der Konstruktion des Innenliners und der Rückholbaren Kokille ab. Die Aufteilung der verschiedenen Abfallarten auf verschiedene Grubengebäudeflügel wird dazu führen, dass sich die *hydrochemischen Verhältnisse* in den beiden Bereichen unterscheiden. Für die Metallkorrosion ist kein Kontakt

der Initial-Barriere mit Wasser in flüssiger Form notwendig, sondern es reicht bereits die Luftfeuchtigkeit. Der Zutritt von Lösungen zum Innenliner wird durch die Auflockerungszone und den Buffer beeinflusst. Da der Innenliner anfänglich aerosoldicht ist, erfolgt die Metallkorrosion der Rückholbaren Kokille von außen zu Beginn lediglich durch die Feuchtigkeit in der Sandverfüllung und von Innen durch die Feuchtigkeit in der Kokille. Sobald der Innenliner nicht mehr dicht ist, korrodiert die Kokille zusätzlich durch von außen zutretende Lösungen. Die Metallkorrosion kann durch *mikrobielle Prozesse* an der Oberfläche der Barrieren verstärkt werden. Sobald die Temperatur nach Überschreiten des Temperaturmaximums im Innenraum des Innenliners unter 120°C sinkt, sind mikrobielle Aktivitäten wieder möglich. Durch die Metallkorrosion erfolgt eine Bildung von Wasserstoff. Das gebildete Wasserstoffgas kann zum Aufbau eines Fluiddrucks sowie zu einer Materialversprödung des Innenliners und der Rückholbaren Kokille durch Wasserstoffaufnahme in das Metall führen.

Die Intensität der **Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme** hängt vor allem vom Material und der Konstruktion der betroffenen Initial-Barrieren sowie von der verfügbaren Wasserstoffmenge ab, und somit letztendlich von der Metallkorrosion.

Die Funktion der beiden Initial-Barrieren Buffer und Bohrlochverschluss kann durch die **Alteration von Verschlussbauwerken** beeinträchtigt werden. Entsprechende einwirkende chemische Prozesse sind die **Alteration von Tonmineralen**, die **Alteration von sonstigen Mineralen** und die **Korrosion von Materialien mit Zementphasen**. Die Ausprägung dieser Alterationsprozesse hängt vor allem von der Lösungszusammensetzung, der Temperatur und der Art der alterierenden Materialien sowie der Konstruktion der technischen Komponenten ab. Aufgrund der unterschiedlichen Abfallarten werden sich die hydrochemischen Verhältnisse in den Einlagerungsbereichen der beiden Endlagerflügel unterscheiden. Sobald die Lebensbedingungen für die Mikroben günstig sind, d. h. geeignete Temperaturen, Wasseraktivitäten und Salzgehalt sowie Vorhandensein vom Lebensraum und von Elektronendonatoren, Elektronenakzeptoren und Nährstoffen, können mikrobielle Prozesse im Grubengebäude zu einer erheblichen Beschleunigung von Alterationsprozessen führen. Für das zutretende Grund- und Porenwasser sind hohe NaCl-Konzentrationen zu erwarten.

Während sich *Alteration von Tonmineralen* und *Alteration von sonstigen Mineralen* direkt auf die Dichtfunktion der Bohrlochverschlüsse auswirken, können die Alteration der Betonwiderlager oder der Buffer (Widerlagerfunktion für den Bohrlochverschluss) die Stabilität der Barrieren beeinträchtigen. Dies kann dazu führen, dass die Dichtelemente der Bohrlochverschlüsse nicht in ihren Einbaupositionen gehalten werden und dann ebenfalls die Dichtfunktion beeinträchtigt ist. Die genannten Alterationsprozesse beeinflussen die Eigenschaften der Initial-Barrieren Buffer und Bohrlochverschluss, wie z. B. deren Porosität oder Permeabilität und auch mechanische Eigenschaften, wie die Festigkeit. Eine Korrosion des Portlandzements und eine Alteration der Zuschlagstoffe in den Widerlagern und Dichtelementen können über sehr lange Zeiträume auftreten. Um einer Beeinträchtigung der Funktion der Barrieren durch Korrosions- und Alterationsprozessen vorzubeugen, ist das Betonwiderlager eines Bohrlochverschlusses so dimensioniert (Opferschichten), dass es auch nach einer teilweisen Korrosion noch seine Stützfunktion erfüllen kann.

Thermische Einwirkungen (*Wärmestrom*) betreffen Buffer und Bohrlochverschlüsse in den Einlagerungsfeldern mit wärmeentwickelnden Abfällen. Da nur für wenige 100 Jahre Temperaturen über 100°C auftreten, wird die Aufheizung nicht zu signifikanten Mineralumwandlungen der Tone im Buffer und Bohrlochverschluss und auch zu keinen relevanten Änderungen der hydraulischen Eigenschaften des Bentonits führen. Fast alle chemischen Prozesse (z. B. Korrosion) sind aber temperaturabhängig und laufen bei hohen Temperaturen rascher ab.

Durch die Auffahrung des Grubengebäudes kommt es zu **Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge**. Eine weitere Ursache für Spannungsänderungen

und Spannungsumlagerungen sind *Erdbeben*. Alle Initial-Barrieren sind gegen ein Bemessungsbeben (nach KTA 2201.1) mit einer Intensität von VII MSK ausgelegt.

Die Spannungsumlagerungen infolge der Auffahrung der Grubenräume führen an der Hohlraumkontur zu Gebirgsverformungen (**Konvergenz**). Die Ausprägung der *Auflockerungszone und der ungesättigten Zone* beeinflussen den Konvergenzprozess. Um die Bohrlöcher wird eine ca. 1 m mächtige Auflockerungszone mit einer zunächst erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit erwartet. Das konvergierende Gebirge läuft im Nahfeld auf den Bohrlochverschluss und – nach dem Versagen des Außenliners in der frühen Nachverschlussphase – auf den Buffer auf. Das führt zu einer Einspannung der Initial-Barrieren und schließt die Auflockerungszone. Die Einspannung des Bohrlochverschlusses ist für dessen Funktion notwendig. Sollte die Einspannung nicht wie geplant erfolgen, so kann die Funktion des Bohrlochverschlusses beeinträchtigt werden. *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* wirken auch auf den *Innenliner* und die *Rückholbare Kokille*. Im Gegensatz zur Rückholbaren Kokille ist der Innenliner gegen die erwarteten Gebirgsspannungen ausgelegt.

Zu frühen Zeiten kann sich im Bohrloch vor allem durch die korrosionsbedingte Gasproduktion ein hoher Fluiddruck aufbauen. Dieser führt zu Spannungsänderungen und -umlagerungen in der Umgebung des Bohrlochs, die auch den Buffer und den Bohrlochverschluss beeinflussen. Außerdem wirkt der *Fluiddruck* als Stützdruck der *Konvergenz* entgegen.

Die Spannungsänderungen werden auch durch die *thermische Expansion oder Kontraktion* auf Grund der (zunächst) erhöhten Temperatur (*Wärmestrom*) im Nahfeld der Einlagerungsbereiche für wärmeentwickelnde Abfälle für einige hundert Jahre beeinflusst. Thermomechanische Einwirkungen in Folge von Expansion oder Kontraktion sind für alle Barrieren zu betrachten. Weitere Einflüsse auf die Spannungsänderungen und die Konvergenz haben jene Prozesse, die das Volumen der Materialien im Bohrloch verändern. Dies sind vor allem das Quellen des Buffers und die **nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien**. Letztere wird hauptsächlich durch die Volumenzunahme der Korrosionsprodukte gegenüber den Metallen durch *Metallkorrosion* verursacht. Weiterhin sind Volumenänderungen des Betonwiderlagers des Bohrlochverschlusses zu nennen.

Durch den **Fluiddruck** wirkt eine hydraulische Last auf die Barrieren. Der Fluiddruck im Nahfeld hängt einerseits von den vorhandenen Lösungs- und Gasmengen und andererseits von den hydraulischen Eigenschaften der vorhandenen technischen Komponenten und Barrieren sowie der Auflockerungszone und des Wirtsgesteins ab. Die *Lösungsmengen* setzen sich aus den eingebrachten sowie den zutretenden Lösungen zusammen (*Strömungsprozesse im Grubengebäude*). Die Gasmenge wird im Wesentlichen von der *Gasbildung* durch *Metallkorrosion*, *mikrobielle Prozesse* und *Radiolyse* bestimmt. Die Reduzierung des Hohlraumvolumens in den Grubenräumen und der Auflockerungszone durch Konvergenz führt zu einer Erhöhung des Fluiddrucks. Änderungen der Fluiddrucks ergeben sich auch durch thermische (*Wärmestrom*) oder nicht thermische Volumenänderungen. *Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen* in den Nahfeldbarrieren und in der Auflockerungszone beeinflussen über die geänderten hydraulischen Eigenschaften den Fluiddruck.

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude umfassen die Gesamtheit der durch Mikroben verursachten Prozesse im Grubengebäude. Die natürlich vorkommenden Bentonite enthalten bereits mikrobielle Populationen, daher können Mikroben den aus Bentonit gebauten Buffer und den Bohrlochverschluss direkt beeinträchtigen, indem sie den Mikroben als Nährstoffquelle, Elektronendonator oder Elektronenakzeptor dienen. Eine Beeinträchtigung der Initial-Barrieren *Innenliner* und *Rückholbare Kokille* erfolgt indirekt über die FEP *Metallkorrosion* und *hydrochemische Verhältnisse*. Sowohl die Metallkorrosion des Innenliners und der Rückholbaren Kokille, als auch Alterationsprozesse der geotechnischen Barrieren können durch die mikrobiellen Prozesse in ihrer Ausprägung verstärkt werden. In den Einlagerungs-

bereichen mit wärmeentwickelnden Abfällen erreicht die Temperatur im Bohrloch nach wenigen zehner Jahren Werte über 120 C, wodurch diese Bereiche sterilisiert werden. Wenn die Temperatur nach einigen hundert Jahren wieder deutlich zurückgegangen ist, kann durch Transportprozesse eine Wiederbesiedlung des Bohrlochs mit Mikroben erfolgen.

Die **Radionuklidmobilisierung** wird in erster Linie von den Korrosions- und Zersetzungsprozessen der jeweiligen Abfallmatrices bestimmt. Die Zersetzungsprozesse werden wiederum vor allem von der Art der Abfallmatrix, den hydrochemischen Verhältnissen der Lösung und der Temperatur (Wärmestrom) bestimmt. Unter Umständen erfolgt auch eine Beeinflussung der Korrosionsprozesse der Abfallmatrix dadurch, dass die Löslichkeitsgrenzen der Hauptbestandteile der Abfallmatrices (Uran bei den Brennelementen und Silizium bei den verglasten Abfällen) erreicht werden und sich dann die Mobilisierungsrate einiger Abfallarten verringert. Ein geringer Anteil der Radionuklide kann schon bei der Einlagerung gasförmig im Behälter vorliegen und freigesetzt werden, sobald der Behälter, z. B. aufgrund unerkannter Defekte, versagt. Dieser Anteil der Radionuklide liegt somit praktisch bereits im Behälter mobilisiert vor.

Der **Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und in der Gasphase** wird vor allem durch die Transportprozesse *Advektion* und *Diffusion*, sowie durch den Rückhalteprozess *Sorption und Desorption* an Tonmineralen und sonstigen Mineralen, z. B. Korrosionsprodukten, bestimmt. Eine *Advektion* und die damit verbundene *mechanische Dispersion* finden nur bei einer vorhandenen Strömung von Fluiden statt. Die *Strömungsprozesse im Grubengebäude* wiederum hängen vom *Fluiddruck* als Antriebsmechanismus und von der Permeabilität und Porosität aller im Nahfeld vorhandenen Materialien und Bauwerke und der Auflockerungszone ab. Der Einfluss des kolloidgetragenen Radionuklidtransports wird auf Grund der hohen Filtrationswirkung der Tonbarrieren für Kolloide als Folge der geringen mittleren Porendurchmesser als eher gering erachtet. Wenn keine Gradienten des Fluiddrucks vorhanden sind, oder die Permeabilität der Materialien sehr gering ist, dann überwiegt *Diffusion* als Transportprozess. Diese hängt vor allem vom Konzentrationsgradienten des transportierten Stoffes und seiner Komplexierung (*hydrochemische Verhältnisse*) und der Temperatur (*Wärmestrom*) ab.

Alle im Vorangegangenen für das Nahfeld beschriebenen Prozesse sind von der Temperatur (*Wärmestrom*) abhängig. Daraus können sich Unterschiede in der Ausprägung der Prozesse in den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle und den Einlagerungsbereichen mit weniger wärmeentwickelnden Abfällen ergeben. So werden in den "kühlen" Endlagerbereichen keine thermomechanischen Spannungen oder konvektiven Strömungsvorgänge auftreten. Die bei hohen Temperaturen erhöhten Reaktionsraten verschiedener chemischer Prozesse entfallen, dafür finden die Mikroben günstige Lebensbedingungen und können Alterations- und Korrosionsprozesse beschleunigen.

Alle für das Nahfeld beschriebenen mechanischen (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*), hydraulischen (*Strömungsprozesse*) und thermischen Prozesse (*Wärmestrom*) stehen am Kontakt in enger Wechselwirkung mit entsprechenden Prozesse in den umgebenden Teilsystemen "Strecken und Schächte" sowie "Wirtsgestein". Durch die Strömungsprozesse und die damit gekoppelten Transportvorgänge werden auch die hydrochemischen Verhältnisse in den Teilsystemen wechselwirken.

6.2.2 Teilsystem „Strecken und Schächte“

Im Teilsystem Strecken und Schächte sind gemäß dem Endlagerkonzept 4 Schachtverschlüsse, 8 Streckenverschlüsse im schachtnahen Bereich sowie 104 Streckenverschlüsse in den Querschlägen der Einlagerungsfelder zu errichten (Lommerzheim & Jobmann 2015).

Auf Grund der unterschiedlichen Randbedingungen der Systementwicklung in den verschiedenen Abschnitten des Teilsystems wird die Beschreibung in die Bereiche "Schächte", "Infrastrukturbereich" sowie "Verbindungs-, Wetter- und Zugangsstrecken" unterteilt. Weiterhin wird der Radionuklidtransport separat beschrieben.

In Tab. 6.3 sind die gemäß dem FEP-Katalog im Teilsystem Strecken und Schächte zu berücksichtigenden Initial-FEP und die FEP zum Radionuklidtransport zusammengestellt. In den nachfolgenden Beschreibungen wird auf diese FEP Bezug genommen, dabei werden auch wichtige beeinflussende FEP genannt. Die Reihenfolge der diskutierten FEP orientiert sich an sachlichen Zusammenhängen und nicht an der Reihenfolge in der Tabelle (diese ergibt sich aus der Reihenfolge im FEP-Katalog).

Tab. 6.3: Zu berücksichtigende FEP im Teilsystem Strecken und Schächte

Initial-FEP	Beeinträchtigte Initial-Barrieren
Alteration von Verschlussbauwerken	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Konvergenz	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Fluiddruck	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Korrosion von Materialien mit Zementphasen	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Lageverschiebung von Schachtverschlüsselementen	Untere Schachtverschlüsse
Alteration von Tonmineralen	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Alteration von sonstigen Mineralen	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Streckenverschlüsse, untere Schachtverschlüsse
FEP zum Radionuklidtransport	
Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	
Radionuklidtransport in der Gasphase	

6.2.2.1 Schächte

Die unteren und oberen Schachtverschlüsse werden errichtet, um den Lösungszutritt aus dem Deck- und Nebengebirge in das Grubengebäude und die Einlagerungsbereiche sowie die Freisetzung möglicherweise kontaminierter Lösungen aus dem Grubengebäude zu begrenzen. Bei der Auslegung der Schachtverschlüsse wird eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt. Gemäß der geowissenschaftlichen Langzeitprognose entspricht dies dem Zeitraum bis zum Höhepunkt der nächsten Kaltzeit (Mrugalla 2014). Für diesen Zeitraum sind die hydrogeologischen Verhältnisse im Nebengebirge prognostizierbar und können daher bei der Auslegung der Verschlüsse berücksichtigt werden. Während der Funktionsdauer der Verschlüsse wird der Versatz im Grubengebäude soweit quellen und kompaktieren, dass er die Funktion der Verschlussbauwerke übernehmen kann. Nach Ende der vorgesehenen Funktionsdauer ist für das Referenzszenarium ein Verlust der Integrität der Schachtverschlüsse nicht auszuschließen.

Die Eigenschaften der Verschlussmaterialien, die Konstruktion der Schachtverschlüsse und die resultierenden mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowie die Eigenschaften der Auflockerungszone sind wichtige Ausgangsbedingungen für das Auftreten und die Ausprägung der **Alteration von Verschlussbauwerken**. Die hydrochemischen Verhältnisse im Grubenbau hängen zunächst von den Verhältnissen in der Geosphäre ab, wobei in den Schächten Lösungen aus unterschiedlichen Grundwasserstockwerken (oben Süßwasser, unten salinare Wässer) und von der Oberfläche zu berücksichtigen sind. Durch die Verwendung unterschiedlicher Baustoffe in den verschiedenen Schachtverschlusselementen wird dieser Situation Rechnung getragen. Daher werden die entsprechenden Lösungen nur zu einer begrenzten Korrosion der Baustoffe führen. Durch Alterationsprozesse am *Verschlussmaterial* und am Schachtausbau (*Technische Einrichtungen*) wird die Ursprungslösung modifiziert. Ein Ausgleich des lokal unterschiedlichen Chemismus findet in den Schächten durch Strömungs- und Stofftransportvorgänge statt. Ein wichtiger potentieller Transportpfad ist die *Auflockerungszone*, die in den Schächten eine Mächtigkeit von bis zu 10 m und eine deutlich erhöhte hydraulische Durchlässigkeit (10^{-8} bis 10^{-9} m/s) haben kann. Der stark aufgelockerte konturnahe Bereich (ca. 1 m mächtig) wird im Bereich der Schachtverschlusselemente vor der Errichtung weitgehend entfernt.

Grundlegende Änderungen der hydrochemischen Verhältnisse in der Geosphäre werden bis zum Höhepunkt der nächsten Kaltzeit nicht erwartet. Gleichwohl ist die Entwicklung der hydrochemischen Verhältnisse nicht in allen Details prognostizierbar, so dass trotz der Verwendung möglichst kompatibler Baustoffe eine Alteration der Verschlussbauwerke nicht auszuschließen ist. Es ist aber nur eine langsame und geringe Alteration der Verschlüsse während der vorgesehenen Funktionsdauer zu erwarten. Um trotzdem die Funktion der Barrieren über die erforderliche Funktionsdauer zu gewährleisten, sind die Schachtverschlusselemente einerseits so dimensioniert, dass die erwartete Korrosion die Funktion der Barrieren nicht beeinflusst (Opferschichten), und andererseits sind sie redundant (untere / obere Schachtverschlüsse) bzw. diversitär (Bentonit und Asphalt / Bitumen-Dichtungen) ausgelegt. Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung der Verschlussmaterialien und bei der Errichtung der Verschlussbauwerke gewährleisten einen anforderungsgerechten Einbau der Verschlüsse.

Ein wichtiger Prozess für die Herstellung der Dichtfunktion ist die Aufsättigung und das Quellen des Bentonits. Dies kann durch alterierte Lösungen mit Degradationsprodukten des Betons bzw. Korrosionsprodukten der Stahlliner in ungünstiger Weise beeinflusst werden. Der vorgesehene Ca-Bentonit ist mit dem Chemismus der erwarteten Lösungen kompatibel. Durch eine Zumischung von Quarzsand wird sichergestellt, dass der Quelldruck des Bentonits den Fracdruck des angrenzenden Gebirges nicht überschreiten wird.

Durch Spannungsumlagerungen im Gebirge wird die **Konvergenz** an der Schachtkontur induziert. Diese bewirkt eine Hohlraumverkleinerung, die zu einer Einspannung der Schachtverschlusselemente führt. Diese Einspannung ist – in Kombination mit dem Quellen der Verschlussmaterialien – eine Voraussetzung für die Dicht- und Widerlagerfunktion der Schachtverschlusselemente.

Neben der Konvergenz führen Volumenänderungen von Baumaterialien (**Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien** (Betonquellen, Setzung von Versatz, Auflösung und Ausfällung) sowie **Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen**) zu Änderungen der Hohlraumvolumina bzw. der Einspannung. Diese Prozesse beeinflussen daher auch die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften der Bauwerke. Außerdem wirkt sich die Intensität der Einspannung auf das Schließen oder Öffnen der Kontaktzone Verschluss / Schachtkontur und der Risse in der Auflockerungszone aus. Ein Erdbeben kann zu Rissen im Beton bzw. zu Setzungen des Versatzes in der Schachtsäule führen, die sich auf die Funktion des Schachtverschlusses auswirken können.

Geringfügige **Lageverschiebungen von Schachtverschlusselementen** sind beim Aufsättigen und Quellen der Baumaterialien normal. Diese Verschiebungen werden bei der Auslegung der Barriere berücksichtigt und werden daher die Funktion der Barriere nicht beeinträchtigen. Weiterhin können mechanische oder hydraulische Lasten zu Lageänderungen und begrenzten Konturabrissen führen, wenn sie zu frühen Zeiten auftreten, zu denen die Einspannung der Barriere noch nicht abgeschlossen ist. Aus den Konturabrissen können Wegsamkeiten resultieren, die der Alteration Vorschub leisten und die Barrierenfunktion beeinflussen. Die Auswirkungen dieser Entwicklungen müssen ebenfalls durch die Auslegung abgedeckt werden.

Chemische Einwirkungen, die die Verschlussmaterialien betreffen (**Alteration von Tonmineralen, Alteration von sonstigen Mineralen, Korrosion von Materialien mit Zementphasen**), können die Funktion der Schachtverschlusselemente beeinflussen. Während sich Alterationen der Tonminerale direkt auf die Dichtfunktion auswirken, können Alterationen der Betonwiderlager die Lagestabilität beeinträchtigen. Dies kann dazu führen, dass die Dichtelemente nicht in ihrer Einbauposition gehalten werden und dann ebenfalls die Dichtfunktion beeinträchtigt ist. Durch konstruktive Vorsorgemaßnahmen (Opferschichten, Redundanz, Diversifikation) wird gewährleistet, dass die Auswirkungen dieser Alterationen begrenzt werden und die Schachtverschlüsse gleichwohl ihre Funktion erfüllen. Die Auflockerungszone, die die Verschlussbauwerke umgibt, kann ebenfalls von einer Alteration der Minerale betroffen sein. Dadurch können die hydraulischen Eigenschaften verändert werden.

Durch den jahrzehntelangen Betrieb ist in den Schächten eine Vielzahl **mikrobieller Prozesse im Grubengebäude** zu erwarten. Außerdem enthalten die bei der Verfüllung der Schächte eingesetzten Verschluss- und Versatzmaterialien Mikrobenpopulationen. Weiterhin findet ein Austausch mit den Mikrobenpopulationen im Wirtsgestein und Nebengebirge statt. Daher können Mikroben auch die Eigenschaften der Schachtverschlüsse direkt beeinflussen, wenn ihnen das Verschlussmaterial als Nährstoffquelle, Elektronendonator oder Elektronenakzeptor dient. Weiterhin kann die Intensität der Alterations- und Korrosionsprozesse durch mikrobielle Prozesse verstärkt werden.

Der **Fluiddruck** in den Schächten hängt einerseits von den verfügbaren Lösungen und Gasen und andererseits von den hydraulischen Eigenschaften der unteren und oberen Schachtverschlüsse sowie der Streckenverschlüsse, des Versatzes, der Auflockerungszone sowie des Wirtsgesteins und Nebengebirges ab. Der überwiegende Teil der Lösungen wird aus dem Wirtsgestein, dem Nebengebirge zutreten. Weiterhin werden mit dem Versatz und den Verschlussmaterialien Lösungen eingebracht. Durch chemische Prozesse (Korrosion, Alteration) wird Wasser verbraucht. Die Eigenschaften der Lösungen werden durch die hydrochemischen Verhältnisse im Grubenbau charakterisiert. Der Gas-Anteil der Fluide besteht aus Grubenluft und Korrosionsgasen, die z. T. aus dem Grubengebäude entweichen können. Der Fluiddruck wirkt als hydraulische Last auf die Schachtverschlusselemente. Der erwartete Fluiddruck wird im Zuge einer Vorbemessung bei der Auslegung der Schachtverschlüsse berücksichtigt. Der Porendruck kann die Kompaktion der Baustoffe und damit die hydraulischen Eigenschaften beeinflussen. Da die hydraulischen Eigenschaften (Porosität, Permeabilität) einerseits die Kontaktfläche mit den Lösungen und andererseits Stoffzufuhr und -abfuhr bestimmen, sind sie wichtig für die Ausprägung der Alterationsprozesse.

Die **Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen** in den Schächten hängen von den mechanischen Eigenschaften der Verschluss- und Versatzmaterialien, von der Konstruktion der Verschlussbauwerke sowie von den Randbedingungen (Spannungsverhältnisse im umgebenden Gebirge) ab. Der lithostatische Druck wird bei der Auslegung der Schachtverschlüsse zugrunde gelegt. Auch hydraulische Lasten (Fluiddruck) können zu Spannungen in den Verschlussbauwerken führen. Das Quellen der Baustoffe (Bentonit, Beton) führt zu Spannungen in den Schachtverschlusselementen und zu einem Stützdruck auf die Schachtkontur, der wiederum zu Spannungsänderungen in der Auflockerungszone und im angren-

zenden Gebirge führen wird. Die Baustoffrezepteuren werden so gewählt, dass der resultierende Quelldruck den Fracdruck des angrenzenden Gebirges nicht überschreiten wird.

Weiterhin wird bei der Auslegung aller Verschlussbauwerke das **Bemessungserdbeben** der Intensität VII MSK (nach KTA 2201.1) berücksichtigt. Daher wird ein derartiges Erdbeben zu keinen relevanten Auswirkungen auf die Funktion der Barrieren führen.

Im Gegensatz zum Nahfeld sind im oberen Teil der Schächte im oberen Teil der Schächte durch klimabedingte Einwirkungen Änderungen der Spannungsverhältnisse zu erwarten. So kann es während der Funktionsdauer der Schachtverschlüsse zu einer tiefgreifenden Abkühlung des Gebirges durch die Bildung von Permafrost kommen. Dies könnte zu einem Abklingen der Konvergenz und zu einer Beeinträchtigung der Schachtverschlüsse durch Kontraktionsrisse führen. Nach mehr als 50.000 a kann es am Standort auch zu einer Eisüberdeckung, Rinnenbildungen und geänderten hydrochemischen Verhältnissen kommen. Da diese kaltzeitlichen Einwirkungen erst nach der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse auftreten, haben sie sicherheitstechnisch nur eine untergeordnete Bedeutung.

Eine anthropogen bedingte Klimaerwärmung mit resultierendem Meeresspiegelanstieg während der vorgesehenen Funktionsdauer der Schachtverschlüsse würde nur zu einer geringfügigen Überflutung von Tälern führen. Doch könnten sich die hydrochemische Verhältnisse im Nebengebirge und in den Schächten ändern, was Auswirkungen auf die Alterationsprozesse und somit auf die Funktion der Schachtverschlüsse haben könnte.

Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Tone und der großen Entfernung von den Einlagerungsfeldern sind thermomechanische Einwirkungen (*thermische Expansion oder Kontraktion*) nur von geringer Bedeutung für die Schachtverschlüsse und den Infrastrukturbereich.

Die für die Schächte beschriebenen mechanischen (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*) und hydraulischen Prozesse (*Strömungsprozesse*) stehen am Kontakt in enger Wechselwirkung mit dem restlichen Grubengebäude und mit den umgebenden Teilsystemen "Wirtsgestein" sowie "Nebengebirge". Durch die Strömungsprozesse und die damit gekoppelten Transportvorgänge werden auch die hydrochemischen Verhältnisse in den Teilsystemen wechselwirken.

6.2.2.2 Infrastrukturbereich

Der Infrastrukturbereich soll als Speichervolumen für über den Schacht zutretende Lösungen und für möglicherweise kontaminierte Lösungen und Gase aus den Einlagerungsbereichen dienen. Daher soll dieser Bereich mit nicht kompaktierbarem Quarz-Schotter versetzt werden, wodurch ein Speichervolumen von ca. 80.500 m³ zur Verfügung steht. Die Volumenreduzierung durch Setzung (**nicht thermisch induzierte Volumenänderung**) wird nur gering sein. Da der Infrastrukturbereich aus Gründen der Betriebssicherheit durch einen Streckenausbau aus Beton stabilisiert wird, ist ein Auflaufen des Gebirges (**Konvergenz**) erst nach Korrosion und Versagen des Streckenausbaus in der frühen Nachverschlussphase möglich. Durch das Speichervolumen wird zu frühen Zeiten einerseits die Druckbeaufschlagung der Streckenverschlüsse auf der Schachtseite verzögert und andererseits bei einer Fluidauspressung aus dem Grubengebäude der Fluidruck am unteren Schachtverschluss reduziert. Aufgrund orientierender Rechnungen wird erwartet, dass das Speichervolumen in einigen 1.000 a mit Lösungen und Gasen gefüllt sein wird. Im Gegensatz zum Streckenversatz wird der nicht kompaktierbare Versatz durch die auflaufende Konvergenz nur geringfügig verdichtet und es baut sich schnell ein Stützdruck auf. Stärkere Umlösungen (**Alteration von sonstigen Mineralen**) sind aufgrund des Schottermaterials (Quarz) und der hydrochemischen Verhältnisse nicht zu erwarten. Durch die hohe Porosität bietet der Speicherraum günstige

Lebensbedingungen für Mikroben (**Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude**). Mögliche Auswirkungen auf die Alteration der angrenzenden Schacht- und Streckenverschlüsse sind zu bewerten.

6.2.2.3 Verbindungs-, Abwetter- und Zugangsstrecken

Das Endlagerkonzept sieht 8 große Streckenverschlüsse mit mehreren Dichtelementen zur Trennung von Infrastrukturbereich und Verbindungs- bzw. Wetterstrecken vor sowie 104 kleinere Streckenverschlüsse mit einem Dichtelement zur Trennung der Querschläge der Einlagerungsfelder von den Verbindungsstrecken. Diese Verschlüsse haben die Aufgabe, einen Lösungszutritt zu den Einlagerungsfeldern über die Verbindungsstrecken solange zu begrenzen, bis der kompaktierte Streckenversatz die Barrierenfunktion der Verschlussbauwerke übernehmen kann. Bei der Auslegung der Streckenverschlüsse wird – analog zu den Schachtverschlüssen – eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren zugrunde gelegt, in der diese Funktion gewährleistet sein muss. Der Streckenausbau wird an den Einbaulokationen der Streckenverschlüsse entfernt. Die Auflockerungszone und ungesättigte Zone kann in den Verbindungs- und Wetterstrecken mit Offenstandszeiten von bis zu ca. 70 – 80 Jahren eine Mächtigkeit von 6 bis 10 m haben, in den Querschlägen und Bohrlochüberfahrungsstrecken mit Offenstandszeiten von wenigen Jahren nur von wenigen m. An den Einbaupositionen der Verschlussbauwerke wird der konturnahe stark aufgelockerte Bereich der Auflockerungszone entfernt. Zudem wird die Auflockerungszone an den Verschlussbauwerken durch mehrere m tiefe Dichtschlitze unterbrochen.

Die Eigenschaften der Verschlussmaterialien, die Konstruktion der Streckenverschlüsse und die resultierenden mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowie die Eigenschaften der Auflockerungszone bestimmen die Beständigkeit der Verschlüsse bei einem Lösungszutritt. Wie bereits für die Schachtverschlüsse beschrieben, ist die Beeinflussung der Verschlüsse durch die **Alteration von Verschlussbauwerken** auf Grund veränderter hydrochemischer Verhältnisse über die Zeit zu berücksichtigen. Dominierend werden die salinaren Lösungen des Wirtsgesteins sein. Abweichungen von diesem Chemismus können sich an der Infrastrukturseite der großen Streckenverschlüssen durch die Alteration technischer Einrichtungen sowie durch eine Vermischung mit geringen Mengen an Nebengebirgslösungen ergeben, die über den Schacht zutreten können. In Richtung auf die Einlagerungsbereiche wird die Hydrochemie durch Lösungen und Gase bestimmt, die durch die Alteration der Nahfeld-Inventare, der Verschluss- und Versatzmaterialien sowie des Streckenausbaus beeinflusst werden. Dieser Chemismus ist auch an den kurzen Streckenverschlüssen in den Querschlägen der Einlagerungsfelder zu unterstellen. Entsprechende Einwirkungen auf die Streckenverschlüsse werden bei der Auslegung der Verschlussbauwerke berücksichtigt. Daher werden die entsprechenden Lösungen nur zu einer begrenzten Korrosion / Alteration der Baustoffe führen. Die Auswirkungen einer **Alteration von Tonmineralen** (Dichtwirkung), der **Korrosion von Materialien mit Zementphasen** (Widerlager) sowie der Zuschlagstoffe (**Alteration von sonstigen Mineralen**) werden hier – wie bei den anderen Verschlüssen – durch konstruktive Vorsorgemaßnahmen reduziert (s.o.). Spezifische redundante Konstruktionsmerkmale sind die Verwendung mehrerer Dicht- und Widerlagerelemente sowie die Verwendung von stützendem Versatz an den beiden Enden der großen Streckenverschlüsse, der die äußeren Dichtelemente nach der Korrosion der Betonwiderlager in den Einbaupositionen halten soll.

Speziell im Bereich der kurzen Streckenverschlüsse in den Einlagerungsfeldern werden die chemischen Prozesse durch die erhöhten Temperaturen beeinflusst. Die Intensität der **mikrobiellen Prozesse im Grubengebäude** und ihre Auswirkungen auf die Alterationsprozesse richten sich nach den lokalen Verhältnissen (Lebensraum, Nährstoffe, Elektronendonatoren / -akzeptoren). Hier ist speziell auf dem Infrastruktur-seitigen Teil der Streckenverschlüsse

se – durch die hohe Porosität der Schotterverfüllung und dem Zutritt von Deckgebirgslösungen – von einer intensiven mikrobiellen Aktivität auszugehen.

Durch Alterationsprozesse an den Baustoffen und technischen Einrichtungen wird die Ursprungslösung modifiziert. Ein Ausgleich des lokal unterschiedlichen Chemismus findet im Grubengebäude durch Strömungs- und Stofftransportvorgänge statt.

Wichtige Ausbreitungspfade im Grubengebäude sind die Firstspalte zwischen *Streckenausbau* und *Versatz* sowie die *Auflockerungszone*. Diese beiden Ausbreitungspfade werden im Bereich der Streckenverschlüsse durch die Dichtelemente und die Bentonit-gefüllten Schlitzte in der Grubenraumkontur unterbrochen. Zwischen den Strömungsvorgängen und dem Fluiddruck besteht eine enge Wechselwirkung, da die Strömungen durch Druckgradienten ausgelöst werden und dann zu einem Druckausgleich führen. Außerdem können Temperaturgradienten die Strömungen beeinflussen (Konvektion).

Der *Streckenausbau* der Verbindungs-, Wetter- und Zugangsstrecken wird nach Verschluss des Endlagers korrodieren und in der frühen Nachverschlussphase versagen. Zu prüfen ist, ob sich durch die Korrosion des Streckenausbaus neue Ausbreitungspfade bilden können.

Der **Fluiddruck** in den Verbindungs- und Zugangsstrecken hängt einerseits von den verfügbaren Lösungen (mit Baustoffen und Versatz eingebracht sowie durch Lösungszutritt aus dem Gebirge und über die Barrieren) und Gasen (Grubenluft und Korrosionsgase, untergeordnet mikrobielle Prozesse und Radiolyse) ab. Andererseits wird er durch die hydraulischen Eigenschaften der technischen Komponenten und Barrieren, des Versatzes, der Auflockerungszone sowie des Wirtsgesteins beeinflusst. Der Fluiddruck und die Temperatur (*Wärmestrom*) wirken auf die Löslichkeit der Gase und somit auf die Gasmenge.

Nicht thermisch induzierte Volumenänderungen (z. B. Betonquellen) sowie das **Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen** sind wichtig für die Funktion der Streckenverschlüsse. Sie werden über den Porendruck den Fluiddruck beeinflussen und führen darüber hinaus zu Spannungen (**Spannungsänderung und Spannungsumlagerung**) in angrenzenden Barrierekomponenten, im Versatz, in der Auflockerungszone und im Wirtsgestein.

Da der Streckenausbau an den Einbaulokationen der Streckenverschlüsse vor der Errichtung der Bauwerke entfernt wird, kann die **Konvergenz** hier direkt auf die Barrieren auflaufen. Die Einspannung der Streckenverschlüsselemente ist wichtig für die Funktion der Verschlüsse und für das Schließen der Kontaktzone Streckenverschluss / Hohlraumkontur sowie der Auflockerungszone.

In den anderen Teilen des Grubengebäudes kann die *Konvergenz* erst nach Versagen des Streckenausbaus auf den Versatz einwirken und dann zum Schließen der Firstspalte über dem Versatz beitragen. Durch den Versatzstützdruck kommt es zu Rissrückbildungs- und im Weiteren zu Rissverheilungsprozessen in der Auflockerungszone versetzter Strecken.

Für das Referenzszenario ist nachzuweisen, dass keine Spannungszustände auftreten, die die Integrität der Verschlussbauwerke innerhalb ihrer vorgesehenen Funktionsdauer beeinträchtigen. Dabei sind die Veränderungen der Spannungen aufgrund der aufgefahrenen Hohlräume, der Konvergenz, die Fluiddrücke, die geänderten Gebirgsauflasten sowie in der Folge von Temperaturänderungen (*Thermische Expansion oder Kontraktion*) im Referenzszenario zu berücksichtigen. Als einzige relevante Ursache für Temperaturänderungen auf der Einlagerungssohle ist die Wärmeproduktion der Abfälle anzusehen, die in der frühen Nachverschlussphase wirkt. Diese Erwärmung ist vor allem für das Nahfeld und die Zugangsstrecken relevant. Neben den Spannungsverhältnissen beeinflusst sie alle chemischen Prozesse.

Weiterhin wird bei der Auslegung der Streckenverschlüsse das **Bemessungserdbeben** mit einer Intensität von VII MSK nach KTA 2101.1 berücksichtigt, so dass ein derartiges Erdbeben die Funktion der Barrieren nicht in relevanter Weise beeinträchtigen wird.

Die für die Strecken beschriebenen mechanischen (*Spannungsänderung und Spannungsumlagerung*), hydraulischen (*Strömungsprozesse*) und thermischen (*Wärmestrom*) stehen am Kontakt in enger Wechselwirkung mit dem "Nahfeld" und dem umgebenden Teilsystem "Wirtsgestein". Durch die Strömungsprozesse und die damit gekoppelten Transportvorgänge werden auch die hydrochemischen Verhältnisse in den Teilsystemen wechselwirken.

6.2.2.4 Radionuklidtransport im Teilsystem Strecken und Schächte

Nach der Mobilisierung von Radionukliden im Nahfeld werden der *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* und der *Radionuklidtransport in der Gasphase* durch das Grubengebäude und das Wirtsgestein stattfinden. Wichtig sind dabei die Transportvorgänge: Während die *Advektion* durch *Strömungsvorgänge im Grubengebäude* sowie im umgebenden Gebirge bestimmt wird, hängt die *mechanische Dispersion* darüber hinaus von der Porenraumstruktur der durchströmten Verschlussbauwerke, des Versatzes (einschließlich der Firstspalte), der Auflockerungszone und des Gebirges ab. Die *Diffusion* wird ebenfalls durch die Porenraumstruktur sowie durch die hydrochemischen Verhältnisse und die Temperatur beeinflusst.

Der Einfluss des kolloidgetragenen Radionuklidtransports wird in Tonformationen und in einem mit tonigem Versatz und Tonverschlüssen verfüllten Grubengebäude als gering erachtet. Der Grund dafür ist die hohe Filtrationswirkung von Tonen für Kolloide auf Grund der geringen mittleren Porendurchmesser. Möglicherweise spielt der Kolloidtransport aber im Bereich des korrodierten Streckenausbaus eine Rolle.

Beim Transport von Radionukliden durch poröse Medien, die die Tonminerale Illit und Smektit enthalten, kommt es z. T. zu einer sehr starken Rückhaltung, so dass z. B. Aktiniden im Nachweiszeitraum nur wenige Meter weit transportiert werden. Der wichtigste Einflussfaktor für die Sorption sind die Materialzusammensetzung der zur Verfügung stehenden Oberflächen, die hydrochemischen Eigenschaften der Lösung und die chemischen Eigenschaften der transportierten Radionuklide. Eine Desorption kann z. B. durch eine Alteration der Minerale ausgelöst werden. Weiterhin sind *Sorption und Desorption* von der Temperatur abhängig.

Der radioaktive Zerfall wird auch während der Transportvorgänge andauern. Bei langsamen Transportvorgängen (z. B. Diffusion) hat dies zur Folge, dass kurzlebige Radionuklide zerfallen sind, bevor die Lösungen die Biosphäre erreichen.

6.2.3 Teilsystem „Wirtsgestein“

Das Wirtsgestein beinhaltet die geologischen Einheiten Hauterivium und Barremium. Teilsystem Wirtsgestein und Initial-Barriere Wirtsgestein sind identisch; weitere Initial-Barrieren befinden sich nicht in diesem Teilsystem. Das Wirtsgestein, das das Grubengebäude einschließlich der Auflockerungszone und der ungesättigten Zone umgibt, ist vollständig lösungsgesättigt. Ein Teil der Fluidvorkommen im Wirtsgestein kann aus Kohlenwasserstoffen bestehen. Im Folgenden wird neben den allgemeinen Einwirkungen auf das Wirtsgestein auch der Radionuklidtransport in diesem Teilsystem beschrieben.

In Tab. 6.4 sind die gemäß dem FEP-Katalog im Teilsystem Wirtsgestein zu berücksichtigenden Initial-FEP und die FEP zum Radionuklidtransport zusammengestellt, die im Folgenden unter Berücksichtigung wichtiger einwirkender FEP diskutiert werden.

Tab. 6.4: Zu berücksichtigende FEP im Teilsystem „Wirtsgestein“, die über das Teilsystem direkt auf ein anderes Teilsystem wirken

Initial-FEP	Schnittstelle zu anderen Teilsystemen
Fluiddruck	Nebengebirge Strecken und Schächte
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Nebengebirge Strecken und Schächte
FEP zum Radionuklidtransport	
Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	Nebengebirge Strecken und Schächte
Radionuklidtransport in der Gasphase	Nebengebirge Strecken und Schächte

Der **Fluiddruck** im Teilsystem „Wirtsgestein“ steht in enger Wechselwirkung mit dem Fluid-
druck in allen anderen Teilsystemen, die sich somit auf den Fluiddruck im Teilsystem Wirtsgestein auswirken. Durch den Fluiddruck wirkt eine hydraulische Last auf die Initial-Barriere Wirtsgestein. Er wird gemeinsam durch den hydrostatischen Druck und den Gasdruck (*Strömungsvorgänge im Wirtsgestein*) bestimmt. Außerdem wird der Fluiddruck durch die *hydrochemischen Verhältnisse im Wirtsgestein* (Dichte, Salinität) und die *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein* (Gasdichte) beeinflusst. Aufgrund der Tiefenlage des Wirtsgesteins kann von gesättigten Grundwässern ausgegangen werden, die eine hohe NaCl-Konzentration aufweisen. Das organische Material der Blättertone in den Ablagerungen des Barremiums hat nicht die thermische Reife zur Bildung von Öl und Gas erreicht. Die Bildung neuer Kohlenwasserstoffe aus dem Kerogen kann ausgeschlossen werden, da der Temperaturimpuls durch die Rückholbaren Kokillen nicht ausreicht und nach ca. 500 Jahren auch größtenteils abgeklungen ist. Innerhalb von 500 Jahren findet nur eine vernachlässigbare Reifeänderung statt. Grundlegende Veränderungen des Chemismus im Wirtsgestein werden in der nächsten Million Jahre nicht erwartet. Aufgrund der Wechselwirkung mit den *Hydrochemischen Verhältnissen im Grubengebäude* können aber in Randbereichen des Wirtsgesteins Alterationen auftreten.

Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge entstehen durch Änderungen des Grundspannungszustandes. Diese können sich durch z. B. durch Auflasten (Erhöhung der Schichtmächtigkeiten durch Sedimentation z. B. infolge *Inlandvereisung*) bzw. eine Änderung der Wassersäule infolge *Transgression oder Regression* ergeben. Im Standortmodell bestimmt das Nebengebirge die Auflast, die auf das Wirtsgestein einwirkt. Weitere Ursachen für Spannungsänderungen können *Vertikale Bewegungen der Erdkruste* sein. Bei *Permafrost* kann es durch das Gefrieren des Porenwassers zu Spannungsänderungen und -umlagerungen in Boden und Gestein kommen, die sich vom Nebengebirge auf das Wirtsgestein übertragen, deren Ausmaß aber mit zunehmender Tiefe abnimmt. Der Fluiddruck beeinflusst über den hydrostatischen Druck die Spannungsverhältnisse in den Teilsystem „Wirtsgestein“ sowie „Strecken und Schächte“. Die Spannungsverhältnisse aus dem Teilsystem „Nebengebirge“ wirken sich auf die Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Teilsystem „Wirtsgestein“ aus.

In der nächsten Million Jahre wird in Norddeutschland eine ähnliche Klimaentwicklung wie in der Vergangenheit erwartet, woraus sich – dem Aktualitätsprinzip folgend – ableiten lässt, dass auch die Ausmaße der zukünftigen Inlandgletscher denen der Vergangenheit ähneln werden. Da die nächste Kaltzeit wahrscheinlich aber nur die Intensität der Weichsel-Kaltzeit erreichen wird, wäre eine länger andauernde Gletscherüberfahrung von größeren Teilen der Fläche des Endlagerstandortmodells frühestens ab der übernächsten Kaltzeit, d. h. in ca. 160.000 Jahren (vgl. Abb. 6.1), möglich.

Wesentliche mechanische Einwirkungen stellen *Erdbeben* ab $I_0 = VII$ MSK (Größe des Bemessungserdbebens) dar. Eine Vorhersage von Erdbeben ist, wie die genaue Prognose ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und Stärke, über statistische Abschätzungen hinaus nicht möglich. Da diese Statistiken auf historischen Beobachtungen beruhen, kann deren Extrapolation auf eine Million Jahre in die Zukunft nur als Näherung verstanden werden.

Der **Radionuklidtransport in der flüssigen Phase** und der **Radionuklidtransport in der Gasphase** werden vor allem durch die Transportprozesse *Advektion* und *Diffusion* sowie durch den Rückhalteprozess *Sorption und Desorption* bestimmt. Advektion und die damit verbundene *mechanische Dispersion* findet nur bei einer vorhandenen Strömung von Fluiden und dem Vorhandensein von Migrationswegen statt. Die wesentlichen Antriebsmechanismen für Strömungsvorgänge im gesättigten Wirtsgestein sind Potenzialunterschiede, wie z. B. der hydraulische Gradient oder Kapillardrucke. *Strömungsvorgänge in der Gasphase* erfolgen im Wirtsgestein hauptsächlich dann, wenn Gase aus dem Grubengebäude in das Wirtsgestein eingedrungen sind. Dieses ist vor allem zu Beginn der Nachverschlussphase möglich, wenn die Gasproduktion im Nahfeld entsprechend groß ist. Die Strömungsprozesse beeinflussen den Transport der in den Fluiden vorliegenden Stoffe. Beim Transport sind sowohl der Lösungs- als auch der Gaspfad zu betrachten. Die Durchströmung des Wirtsgesteins wird durch die Porosität / Permeabilität und den *Fluiddruck* bestimmt. Der Gaseindringdruck bestimmt, ob Gase in das Wirtsgestein eindringen können. Wenn keine Fluiddruck-Gradienten vorhanden sind, oder die Permeabilität der Materialien sehr gering ist, dann findet überwiegend *Diffusion* als Transportprozess statt. Diese hängt vor allem vom Konzentrationsgradienten des transportierten Stoffes (*Hydrochemische Verhältnisse im Wirtsgestein*) und der Temperatur (*Wärmestrom*) ab. Der Einfluss des kolloidgetragenen Radionuklidtransports spielt im Wirtsgestein nur bei einem größeren Porendurchmesser eine Rolle. Außerdem können gelöste Radionuklide Komplexe bilden und in der flüssigen Phase transportiert werden. Alterationen zumindest in Randbereichen des Wirtsgesteins werden dieses so beeinflussen, dass sich dessen Sorptionsfähigkeit und Kolloidbildung, -transport und -filtration ändern, was auch Auswirken auf den Radionuklidtransport haben wird.

6.2.4 Teilsystem „Nebengebirge“

Das Nebengebirge beinhaltet die geologischen Einheiten im Endlagerstandortmodell mit Ausnahme des Wirtsgesteins. Da das Nebengebirge definitionsgemäß keine Initial-Barriere ist und somit keine einschlusswirksame Funktion aufweist und sich auch keine Initial-Barrieren in diesem Teilsystem befinden (Stark et al. 2014), sind bei der Beschreibung des Referenzszenarios nur die FEP zu betrachten, die vom Teilsystem „Nebengebirge“ ausgehend, auf andere Teilsysteme einwirken. Des Weiteren wird die Ausbreitung der Radionuklide im Nebengebirge durch den Radionuklidtransport beschrieben.

In Tab. 6.5 sind die gemäß dem FEP-Katalog im Teilsystem Nebengebirge zu berücksichtigenden Initial-FEP und die FEP zum Radionuklidtransport zusammengestellt, die im Folgenden unter Berücksichtigung wichtiger einwirkender FEP diskutiert werden.

Der **Fluiddruck** im Teilsystem „Nebengebirge“ steht in enger Wechselwirkung mit dem Fluiddruck im Teilsystem „Wirtsgestein“ und wirkt sich daher auf dieses Teilsystem aus. Durch den Fluiddruck wirkt eine hydraulische Last auf die Initial-Barriere Wirtsgestein. Er wird gemeinsam durch den hydrostatischen Druck (*Grundwasserströmung im Nebengebirge*) und den Gasdruck (*Gasströmung im Nebengebirge*) bestimmt. Außerdem wird der Fluiddruck durch die *hydrochemischen Verhältnisse im Nebengebirge* (Dichte, Salinität) und die *Kohlenwasserstoffvorkommen im Nebengebirge* (Gasdichte) beeinflusst. Außerdem steht der Fluiddruck im Teilsystem „Nebengebirge“ in enger Wechselwirkung mit dem Teilsystem „Strecken und Schächte“.

Tab. 6.5 Zu berücksichtigende FEP im Teilsystem „Nebengebirge“, die auch direkt auf angrenzende Teilsysteme wirken.

Initial-FEP	Schnittstelle zu anderen Teilsystemen
Fluiddruck	Wirtsgestein Strecken und Schächte
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Wirtsgestein Strecken und Schächte
FEP zum Radionuklidtransport	
Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	Wirtsgestein Strecken und Schächte
Radionuklidtransport in der Gasphase	Wirtsgestein Strecken und Schächte

Die Spannungsverhältnisse aus dem Teilsystem „Nebengebirge“ wirken sich auf die **Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen** im Teilsystem „Wirtsgestein“ aus. Änderungen des Grundspannungszustandes können sich durch eine Änderung der Wassersäule (*Transgression oder Regression*), Auflasten (zusätzliche Auflast durch *Sedimentation* und *Inlandvereisung*) ergeben. Generell bestimmen das Volumen und die Zusammensetzung des Nebengebirges über dem Wirtsgestein die Auflast, die auf dieses einwirkt. Eine wesentliche mechanische Einwirkung stellen *Erdbeben* ab $I_0 = VII$ MSK (Größe des Bemessungserdbeben) dar, die sich auch vom Teilsystem „Nebengebirge“ in das Teilsystem „Wirtsgestein“ auswirken können. Weitere Ursachen für Spannungsänderungen sind *Vertikale Bewegungen der Erdkruste*. Durch das Gefrieren des Porenwassers bei *Permafrost* kann es zu Spannungsänderungen und -umlagerungen in Boden und Gestein kommen, die sich vom Nebengebirge auf das Wirtsgestein übertragen. Der Fluiddruck beeinflusst über den hydrostatischen Druck die Spannungsverhältnisse in den Teilsystemen Wirtsgestein sowie Strecken und Schächte. Zum Beispiel wirken sich die Spannungsverhältnisse im Nebengebirge auf die oberen Schachtverschlüsse aus.

Der **Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und in der Gasphase** werden vor allem durch die Transportprozesse *Advektion* und *Diffusion* sowie durch den Rückhalteprozess *Sorption* bestimmt. Advektion und die damit verbundene *mechanische Dispersion* finden nur bei einer vorhandenen Strömung von Fluiden und dem Vorhandensein von Migrationswegen statt. Strömungsprozesse können im Nebengebirge in mehreren separaten Grundwassergeringleitern, wie dem Hilssandstein, auftreten und so Voraussetzungen für einen advektiven Transport von Radionukliden schaffen. Der Transport findet nur innerhalb der separaten Grundwassergeringleitern statt, ein advektiver Austauschprozess zwischen den Grundwasserstockwerken wird weitestgehend ausgeschlossen. Neben Strömungsprozessen ist der Radionuklidtransport abhängig von der *Gasströmung im Nebengebirge*. Die Strömungsprozesse wiederum hängen vom *Fluiddruck* als Antriebsmechanismus und von der Permeabilität und Porosität der Gesteine des Nebengebirges ab. Das regionale Grundwasserdruckpotenzial der mesozoischen Aquifere im Nebengebirge wird in erster Linie aus den deutlich höher gelegenen Mittelgebirgen abgeleitet. Wenn keine Gradienten des Fluiddrucks vorhanden sind, oder die Permeabilität der Materialien sehr gering ist, findet vor allem *Diffusion* als Transportprozess statt. Diese hängt vor allem vom Konzentrationsgradienten des transportierten Stoffes (*Hydrochemische Verhältnisse im Nebengebirge*) und der Temperatur (*Wärmestrom*) ab. Der Einfluss des kolloidgetragenen Radionuklidtransports spielt im Nebengebirge nur bei einem größeren Porendurchmesser eine Rolle. Außerdem können gelöste Radionuklide Komplexe bilden und in flüssiger Phase transportiert werden.

7 Alternativszenarien

Im vorhergehenden Kap. 6 wurde für das Endlagerstandortmodell Nord ein Referenzszenarium abgeleitet und in dem 6.2 beschrieben. Zur Demonstration der Methodik der Ableitung von Alternativszenarien werden im Folgenden exemplarisch für die verschiedenen Ausgangspunkte auf der Basis des Referenzszenariums Alternativszenarien abgeleitet.

Entsprechend der in Kap. 3.3.2 beschriebenen Vorgehensweise wurden vier Ausgangspunkten für die Ableitung von Alternativszenarien definiert. Die Alternativszenarien unterscheiden sich nur in einem Aspekt gegenüber dem entsprechenden Referenzszenarium (vgl. auch Kapitel 3.3). So werden auch hinsichtlich der spezifischen Annahmen zum Referenzszenarium alternative Betrachtungen vorgenommen. Analog ist die Vorgehensweise bei den FEP. Entweder wird jeweils zu einem FEP (Initial-FEP bzw. bestimmende FEP zur Radionuklidmobilisierung und zum Radionuklidtransport) eine weniger wahrscheinliche Ausprägung, ein weniger wahrscheinliches FEP oder eine abweichende Ausprägung einer spezifischen Annahme berücksichtigt. Die aus diesen vier Ausgangspunkten abgeleiteten Szenarien werden jeweils in einem separaten Unterkapitel dargestellt.

7.1 Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen

In Kap. 3 wurde bereits ausgeführt, dass es für die Ableitung von Szenarien notwendig ist, zu bestimmten Aspekten Annahmen zu treffen. Bei den Annahmen wird unterschieden zwischen solchen, die einen für das Projekt ANSICHT übergeordneten Charakter haben und solchen, die spezifisch für die Ableitung des Referenzszenariums gelten. Wesentlich für die Ableitung von Alternativszenarien sind hierbei die spezifischen Annahmen, die für das Referenzszenarium getroffen wurden (Kap. 6.1.2).

Für die Ableitung von möglichen Alternativszenarien sind zunächst für jede spezifische Annahme relevante Alternativen zu bestimmen. Alternativen können dabei je nach Formulierung der Annahme eine quantitative Angabe einer physikalischen Größe oder eine qualitative Beschreibung sein.

Im nächsten Schritt wird die Beziehung der betrachteten Alternativen zum FEP-Katalog geprüft. Die Intention hierbei ist, den Zusammenhang zwischen den spezifischen Annahmen und den FEP darzustellen. Dies ist wichtig für die weitere Diskussion und die Beschreibung der möglicherweise zu betrachtenden alternativen Entwicklungen.

Abschließend wird qualitativ abgeschätzt, welche unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten sich im Vergleich zum Referenzszenarium ergeben könnten.

Die kurz dargestellte schrittweise Vorgehensweise bildet die Grundlage für die Ableitung von Alternativszenarien auf der Grundlage von alternativen Betrachtungen zu den spezifischen Annahmen. Alle spezifischen Annahmen sollen systematisch geprüft und gewertet werden. Entsprechend dem derzeitigen, sehr begrenzten Kenntnisstand zu Endlagerkonzepten für deutsche Tonstandorte sind für viele technische Maßnahmen, wie die Verschlussbauwerke, den Versatz und den Streckenausbau, noch grundlegende Untersuchungen bezüglich der Auslegung und der Auswirkungen für die Systementwicklung erforderlich. Während für die Referenzentwicklung unterstellt wird, dass diese Maßnahmen in der vorgesehenen Weise funktionieren, ist für die Alternativszenarien, z.B. ein Versagen der Barrieren oder die Entstehung von Wegsamkeiten im Bereich des Streckenausbaus zu untersuchen.

Diese Vorgehensweise wird exemplarisch für die folgende spezifische Annahme durchgeführt:

„Die Schacht-, Strecken- und Bohrlochverschlüsse, der Buffer sowie Innenliner und Behälter werden anforderungsgerecht hergestellt, so dass – abgesehen von Komponentenfehlern durch die Fehlerquoten in den Fertigungs- und Kontrollverfahren – zukünftige Einwirkungen im Zuge der Referenzentwicklung nicht zu einem vorzeitigen Versagen führen.“

7.1.1 Bestimmung möglicher Alternativen

Die im Folgenden abgeleiteten Alternativen zur o. g. spezifischen Annahme beziehen sich auf ein "Versagen der Verschlussbauwerke bzw. technischen Komponenten während der vorgesehenen Funktionsdauer". Das Versagen dieser Komponenten nach ihrer Funktionsdauer ist wahrscheinlich und daher bereits Teil des Referenzszenarios.

Eine Grundlage für die folgende Diskussion der Funktionsfähigkeit der Verschlussbauwerke ist die nachweisthechnische Festlegung, dass sich die hydraulischen Eigenschaften der Verschlussbauwerke immer aus den integralen Werten für Baukörper, Kontaktzone zum Gebirge und Auflockerungszone ergeben. Daher müssen im Folgenden die Einwirkungen auf diese Bereiche betrachtet werden.

Als Alternative zur o. g. spezifischen Annahme wird unterstellt, dass die Verschlussbauwerke sowie die technischen Komponenten (Innenliner, Behälter) nicht den spezifizierten Anforderungen genügen, d. h. dass sie eine unzureichende bzw. verminderte Wirkungsweise aufweisen und somit "versagen". Die Kriterien für das Versagen der verschiedenen Barrieren leiten sich aus den Anforderungen an die jeweiligen mechanischen oder hydraulischen Funktionen ab. Wenn z. B. durch Korrosion die Gasdichtheit einer Rückholbaren Kokille nicht mehr gewährleistet ist, so hat der Behälter "versagt" auch wenn er immer noch eine Rückhaltefunktion für die in der Abfallmatrix eingeschlossenen Radionuklide hat. Der Innenliner dient dem mechanischen Schutz der Rückholbaren Kokille, daher ist bei ihm die mechanische Integrität das Versagenskriterium usw.

Bei der Fertigung bzw. Errichtung der technischen Komponenten und Verschlussbauwerke wird ein umfangreiches Qualitätssicherungsprogramm zur Anwendung kommen. Für die technischen Komponenten und die Bauwerke werden im Genehmigungsverfahren separate Einzelnachweise ihrer Funktionstüchtigkeit zu erbringen sein. Daher ist die Alternative zu der spezifischen Annahme den "weniger wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten" zuzuordnen. Ein Auftreten systematischer Fehler bei gleichartigen Komponenten wird aufgrund der intensiven Qualitätsprüfung für unwahrscheinlich gehalten und bei den Szenarienentwicklung nicht berücksichtigt.

Die im Folgenden betrachteten weniger wahrscheinlichen Versagensfälle wirken bei der Systementwicklung zusätzlich zum wahrscheinlichen Versagen einiger Nahfeldbarrieren (Bohrlochverschlüsse, Buffer, Innenliner, Behälter) aufgrund unerkannter Defekte. Es handelt sich in diesem Fall um Komponenten, die in großer Menge in das Endlager eingebracht werden (4.935 Bohrlochverschlüsse, 14.810 Rückholbare Kokillen, 64.181 Innenliner-Segmente). Aufgrund der Fehlerquoten in großtechnischen Fertigungs- und Kontrollverfahren kann bei derartigen Komponentenzahlen nicht ausgeschlossen werden, dass eine geringe Anzahl von Komponenten bereits bei der Einbringung unerkannte Fertigungsfehler aufweist bzw. dass bei der Errichtung unerkannte Fehler auftreten werden. Diese unerkannten Fertigungs- bzw. Errichtungsfehler können dazu führen, dass die betroffenen Komponenten ihre sicherheitsrelevanten Funktionen auch während ihrer Funktionsdauer nicht vollumfänglich erfüllen. Da das Auftreten von unerkannten Defekten "wahrscheinlich" ist, wird es bereits im Referenzszenario berücksichtigt.

Im Folgenden werden im Unterschied zum Referenzszenario "weniger wahrscheinliche Entwicklungen" betrachtet, wie

- höhere Fehlerquoten bei den Fertigungs- und Kontrollverfahren, die zu einer größeren Anzahl von Komponenten mit unerkannten Defekten bei der Einbringung führt (nur für die Nahfeldbarrieren relevant, da nur diese in großer Zahl eingebracht werden).
- auslegungsüberschreitende Einwirkungen auf die Komponenten, die zu einem Versagen während der vorgesehenen Funktionsdauer führen können.

Alle zu berücksichtigenden Verschlussbauwerke, technischen Komponenten und die Auflockerungszone werden im FEP-Katalog beschrieben. Hier sind auch die Prozesse, die die genannten Zustände beeinflussen, als einwirkende FEP bzw. die FEP, die die Funktion der Barrieren beeinträchtigen können, als Initial-FEP ausgewiesen (vgl. Tab. 3.1). Der überwiegende Teil der einwirkenden FEP ist für alle Verschlussbauwerke, technischen Komponenten und die Auflockerungszone gleich. Ausnahmen sind die FEP Lageverschiebung von Schachtverschlusselementen und die Alterationsprozesse der Metalle, die Komponentenspezifisch sind. Allerdings unterscheidet sich die Ausprägung der einwirkenden FEP je nach der betrachteten Barriere und den Randbedingungen (Teilsystem).

Bei auslegungsüberschreitenden Einwirkungen sind für die einwirkenden FEP in allen Fällen weniger wahrscheinliche Ausprägungen zu unterstellen (vgl. Tab. 7.1):

Tab. 7.1: Auf Verschlussbauwerke und technische Komponenten einwirkende FEP

Prozessgruppe	Einwirkende FEP
Chemische / mikrobielle Prozesse	Alteration von Verschlussbauwerken
	Auflösung und Ausfällung
	Korrosion von Materialien mit Zementphasen
	Alteration von Tonmineralen
	Alteration von sonstigen Mineralen
	Metallkorrosion
	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme
	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude
Mechanische Prozesse	Konvergenz
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
	Thermische Expansion oder Kontraktion
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen
	Lageverschiebung von Schachtverschlusselementen
Hydraulische Prozesse	Fluiddruck
	Kanalisation in Dichtelementen
	Kolloidbildung, -transport und -filtration

Beispiele für die lokal unterschiedliche Ausprägung verschiedener einwirkender Prozesse sind:

- Die chemischen Einwirkungen sind in den Schächten auf Grund der Verbindung mit unterschiedlichen Grundwasserstockwerken andere als auf der Einlagerungssohle und im Nahfeld.
- Thermische und thermo-mechanische Einflüsse durch die wärmeentwickelnden Abfälle sind vor allem im Nahfeld und in den angrenzenden Bereichen des Grubengebäudes relevant.
- Klimatische Einflüsse treten nur in den Schächten auf.
- Der überwiegende Teil der Metalle im Endlager ist in den Einlagerungsbereichen konzentriert. Aufgrund der Gebirgsfeuchtigkeit setzt hier unmittelbar mit der Einbringung der Metallkomponenten die Metallkorrosion und damit eine Gasbildung ein. Deshalb ist die Entwicklung des Fluiddrucks im Nahfeld deutlich anders als im restlichen Grubengebäude.

Durch orientierende Prozessanalysen kann für die verschiedenen Bereiche eine Abschätzung von Art und Intensität der Einwirkungen sowie der Konsequenzen für die Funktion der Barrieren durchgeführt werden. Auf dieser Grundlage können die Eigenschaften einer "alterierten" Barriere abgeleitet werden.

Die Alternativszenarien beschreiben dann die durch defekte Barrieren beeinflussten Systementwicklungen (= beeinflusste FEP der Komponenten-FEP).

Entsprechend den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) ist bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten das gleichzeitige Auftreten von mehreren Fehlern an funktional unabhängigen Komponenten nicht zu unterstellen. Aus diesem Grund bezieht sich eine alternative Annahme nicht gleichzeitig auf mehrere Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse. Bei den Versagensszenarien wird im Folgenden zudem immer ein Versagen der kompletten Barriere unterstellt, ohne von einer Diversität bzw. Redundanz der Dichtelemente bei den Schacht- und Streckenverschlüssen Kredit zu nehmen. Grund dafür ist, dass der Nachweis der funktionalen Unabhängigkeit für diese Dichtelemente noch nicht geführt wurde.

Bei den Nahfelddbarrieren sind die Komponenten nicht funktional unabhängig, sondern ergänzen sich. So hat der Buffer eine Widerlagerfunktion für den Bohrlochverschluss und verzögert den Lösungszutritt zum Innenliner (und damit dessen Korrosion). Der Innenliner hat eine mechanische (ausgelegt gegen Gebirgsdruck) und hydraulische Schutzfunktion (verzögert den Lösungszutritt und damit die Korrosion) für die rückholbaren Kokillen etc. Daher wird für eine alternative Entwicklung immer das Versagen der kompletten Nahfelddbarrieren eines Bohrlochs unterstellt.

7.1.2 Alternative Betrachtung zur Funktion der Schacht- und Streckenverschlüsse

Als alternative Betrachtung für die Abweichung von der spezifischen Annahme wird ein Versagen der Verschlussbauwerke aufgrund von Fertigungs- bzw. Errichtungsmängeln oder aufgrund von auslegungsüberschreitenden Einwirkungen unterstellt. In der Folge kann die Funktion der Barrieren in der folgenden Weise beeinträchtigt sein:

- Erhöhte integrale Durchlässigkeit des Verschlussbauwerkes wegen
 - erhöhter Durchlässigkeit der Dichtelemente und/oder,
 - erhöhter Durchlässigkeit im Randbereich (Kontaktzone und Auflockerungszone).
- Verringerte Stabilität der Widerlager dadurch Lageverschiebungen der Schachtverschlüsselemente und eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit der Dichtelemente

- Wirkungsvermögen setzt erst zu einem späteren Zeitpunkt als vorgesehen ein (z. B. durch langsamere Aufsättigung der Dichtelemente, langsames Schließen der Kontakt- und Auflockerungszone).
- Verminderte Funktionsdauer der Verschlussbauwerke (z. B. durch abweichenden Chemismus der einwirkenden Lösungen und stärkere Korrosion).

Aufgrund der Dimensionen der Schacht- und Streckenverschlüsse (ca. 120-220 m mächtig, vgl. Kap. 4.2.4) sind lokale Unterschiede hinsichtlich der Materialeigenschaften, wie z. B. Porosität und Permeabilität, nicht auszuschließen. Diese Unterschiede sind jedoch dann tolerierbar, wenn die Planungswerte integral eingehalten werden.

Das Auftreten von fehlerhaft erstellten Funktionselementen der Verschlussbauwerke ist aufgrund der umfassenden Qualitätsprüfung bzw. Kontrolle weniger wahrscheinlich, aber nicht völlig auszuschließen. Derartige Fehler könnten Einfluss auf die Funktionsdauer bzw. eine verspätete Funktionsaufnahme der Verschlussbauwerke haben. Die verringerte Dichtwirkung eines Dichtelementes könnte zu einem verstärkten Lösungstransport und damit zu einer beschleunigten Alteration führen.

Eine Abschätzung der verringerten Funktionsdauer durch fehlerhaft erstellte Schacht- und Streckenverschlüsse wäre nur bei Kenntnis des Fehlers und der Randbedingungen (mechanisch-hydraulisch-chemisch) möglich. Gleiches gilt auch für die Einschätzung einer verspäteten Aufnahme des vorgesehenen Wirkungsvermögens.

Zusammenfassend ist daher eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit das wesentliche Merkmal alterierter Schacht- und Streckenverschlüsse.

Bezug zu den FEP des FEP-Kataloges

Alle für die Ableitung der Alternativszenarien erforderlichen Informationen können unmittelbar dem FEP-Katalog entnommen werden. Die Komponenten-FEP "Untere Schachtverschlüsse", "Obere Schachtverschlüsse" und "Streckenverschlüsse" charakterisieren die Eigenschaften der zu betrachtenden Verschlüsse, aus den einwirkenden FEP lassen sich Veränderungen der Barriereigenschaften ableiten und aus den beeinflussten FEP die Auswirkungen der defekten Barrieren auf die Systementwicklung. Entsprechend der für das Referenzszenarium beschriebenen Vorgehensweise müssen zur Ableitung der Ausprägungen auch die FEP höherer Ebenen berücksichtigt werden. Diese werden an dieser Stelle jedoch nicht benannt, sondern auf den FEP-Katalog verwiesen, der diese Abhängigkeiten im Detail beschreibt und die entsprechenden FEP ausweist.

7.1.2.1 Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses

Die Schachtverschlüsse sollen für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt werden (Lommerzheim & Jobmann 2015). Ein vorzeitiges Versagen dieser Verschlüsse durch Fertigungs- bzw. Errichtungsfehler ist aufgrund der umfangreichen Qualitätssicherungsmaßnahmen weniger wahrscheinlich.

Einwirkende FEP, die – falls sie die Auslegungswerte überschreiten – zu einem Schachtverschlussversagen führen könnten, sind im Kap. 7.2.1 dargestellt. Von den einwirkenden FEP sind in den Schächten die Alterations-FEP von besonderer Bedeutung, da hier eine Anbindung an unterschiedliche Grundwasserstockwerke mit einem verschiedenen Chemismus der Wässer besteht. Zudem kann sich der Chemismus in den oberen Grundwasserstockwerken durch klimatische Einwirkungen ändern. Das aktuelle Konzept der Schachtverschlüsse orientiert sich an der heutigen Hydrochemie. Entwicklungen der Hydrochemie, die von den Annahmen bei der Auslegung abweichen, können zu einer verstärkten Alteration der Baustoffe

führen. Mechanische (z. B. Lithostatischer Druck, Erdbeben) und hydraulische (hydrostatischer Druck) Lasten werden bei der Barrierenauslegung berücksichtigt. Eine wichtige hydraulische Last ist der Fluiddruck im Grubengebäude (vor allem durch Grubenluft und Gasbildung infolge Metallkorrosion). Der Fluiddruck an den Barrieren hängt von der Gasbildungsrate und der Gasdurchlässigkeit von Barriere und angrenzendem Gebirge ab. Die hydraulischen Eigenschaften der Kontaktzone und der Auflockerungszone werden durch die Konvergenz und das Quellen der Baustoffe beeinflusst. Wenn diese Prozesse nicht in der vorgesehenen Weise ablaufen, können Kontaktzone und Auflockerungszone erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten behalten.

Für den Versagensfall wird unterstellt, dass die integrale hydraulische Leitfähigkeit des Gesamtbauwerks (incl. Kontaktzone und Auflockerungszone) erhöht ist, wobei von den Einzelkomponenten der Verschlüsse kein Kredit genommen wird.

Auswirkungen auf die Systementwicklung

Im Folgenden werden die durch ein vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses beeinflussten FEP diskutiert (Tab. 7.3). Sie bestimmen die Abweichungen des hier betrachteten Alternativszenariums vom Referenzszenarium. Die stärksten Auswirkungen werden für dieses Alternativszenarium erwartet, wenn das Versagen des Schachtverschlusses zu einem frühen Zeitpunkt erfolgt, an dem das Grubengebäude noch nicht vollständig mit Gebirgslösungen vollgelaufen ist. In diesem Fall, können Deckgebirgslösungen mit abweichendem Chemismus bis in den Infrastrukturbereich und bis zu den Streckenverschlüssen vordringen.

Die erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten in den Schachtverschlusselementen beeinflussen die chemischen Prozesse und fördern das Fortschreiten der Alteration in weiteren Bereichen des Bauwerks. Die Fluidströme beschleunigen den Abtransport gelöster Stoffe und den Antransport neuer Lösung, so dass größere Stoffmengen alteriert werden können. Infolge der Durchströmung der Barriere können auch Volumenänderungen von Baustoffen auftreten.

Änderungen von Porositäten und Permeabilitäten führen auch zu abweichenden thermischen Eigenschaften und damit zu einer anderen *thermischen Expansion oder Kontraktion* der Baustoffe. Höhere Porositäten bieten auch Lebensraum für Mikroben, die wiederum zur Alteration der Barriere beitragen können (*Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude*).

Durch Änderungen der mechanischen Eigenschaften des Verschlusses ändert sich auch der Stützdruck auf die Schachtkontur. Dies hat Auswirkungen auf die Kontaktzone und die *Auflockerungszone* und deren hydraulischen Eigenschaften. Wenn die Funktion der Widerlager beeinträchtigt wird, kann es zu *Lageverschiebungen von Schachtverschlusselementen* kommen. *Spannungsumlagerungen* und die Schaffung von Hohlräumen durch Auflösungsprozesse können wieder eine *Konvergenz* initiieren.

Durch die erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten des Verschlusses ändern sich die Strömungsvorgänge und der Stofftransport (*Dispersion, Diffusion*) im Grubengebäude. So können Lösungen mit abweichenden Chemismus in das Grubengebäude eindringen. Außerdem können Fluiddruckdifferenzen über und unter der Barriere ausgeglichen werden.

Tab. 7.2: Durch das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses beeinflusste FEP

Prozessgruppe	Beeinflusste FEP
Chemische / mikrobielle Prozesse	Alteration von Verschlussbauwerken
	Auflösung und Ausfällung
	Korrosion von Materialien mit Zementphasen
	Alteration von Tonmineralen
	Alteration von sonstigen Mineralen
	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude
Mechanische Prozesse	Konvergenz
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
	Thermische Expansion oder Kontraktion
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen
	Lageverschiebung von Schachtverschlusselementen
Thermische Prozesse	Wärmestrom
Hydraulische Prozesse	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
	Kanalisation in Dichtelementen
	Fluiddruck
	Kolloidbildung, -transport und -filtration
	Mechanische Dispersion
	Diffusion

Bewertung

Die alternative spezifische Annahme geht von einem vorzeitigen Versagen des Gesamtsystems „Schachtverschluss“ aus und ist weniger wahrscheinlich. Bei der Diskussion des Versagens bleibt der Aufbau des Schachtverschlusses, bestehend aus einer Reihe von Komponenten wie Widerlager und Dichtelemente, unberücksichtigt.

Durch das Versagen des Schachtverschlusses werden die hydraulischen Verhältnisse und damit der Lösungszutritt sowie die Lösungs- und Gasfreisetzung aus dem Grubengebäude beeinflusst. Das Alternativszenarium kann daher durch eine erhöhte integrale Permeabilität eines Schachtverschlusses incl. Kontakt- und Auflockerungszone abgebildet werden. Als mögliche Werte der dabei anzusetzenden Permeabilität können solche für Auflockerungszone, Risse oder poröse Medien mit größerer Porosität herangezogen werden. Die Permeabilität der Dichtelemente des Schachtverschlusses (Tab. 4.2) kann dabei gegenüber dem Referenzwert stark erhöht sein. Falls das vorzeitige Versagen des Schachtverschlusses durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerungszone abgebildet wird, ist auch das Verheilen dieser Auflockerungszone zu betrachten.

Je nach den Einwirkungen kann ein Schachtverschluss zu frühen oder späten Zeiten versagen. Daher sind in diesem Alternativszenarium zwei Versagenszeitpunkte zu betrachten. Die Variante mit frühem Versagen – zu Beginn der Nachverschlussphase – ist dabei für die meisten Entwicklungsmöglichkeiten abdeckend, da ein frühes Zutreten von Lösungen in den

Infrastrukturbereich die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Lösungen bis in die Einlagerungsfelder vordringen. Da jedoch die Auswirkungen eines späten Versagens anders sein können als bei frühem Versagen (z. B. aufgrund des Aufbaus von Gaspolstern im Grubengebäude), ist auch eine Variante zu betrachten, bei der der Schachtverschluss spät, aber noch vor dem Ende der vorgesehenen Funktionsdauer, versagt.

Es wird erwartet, dass das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ abdeckend für andere Alternativszenarien ist, die methodisch anders abgeleitet werden und auf FEP basieren, die ebenfalls Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse beschreiben. Dies trifft z. B. auf das weniger wahrscheinliche FEP "Kanalisation in Dichtelementen" zu. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung von Initial-FEP betrifft Änderungen des betrachteten Prozesses im gesamten Endlagersystem und wird daher nicht abgedeckt.

7.1.2.2 Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Die Streckenverschlüsse sollen, wie die Schachtverschlüsse, für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt werden (Lommerzheim & Jobmann 2015). Ein vorzeitiges Versagen dieser Verschlüsse durch Fertigungs- bzw. Einbaumängel ist aufgrund der umfangreichen Qualitätssicherungsmaßnahmen weniger wahrscheinlich. Bei der Betrachtung von Einwirkungen und Konsequenzen des Versagens der Streckenverschlüsse ist aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen zwischen den großen, redundanten Streckenverschlüssen an der Grenze Richtstrecke / Infrastrukturbereich und den kleinen Streckenverschlüssen in den Querschlägen der Einlagerungsfelder zu unterscheiden.

Einwirkende FEP, die – falls sie die Auslegungswerte überschreiten - zu einem Versagen eines Streckenverschlusses führen könnten, sind im Kap. 7.2.1 angegeben. Von den einwirkenden FEP sind in den großen Streckenschlüssen, die an den Infrastrukturbereich angrenzen, die Alterations-FEP von besonderer Bedeutung. Im Infrastrukturbereich können über den Schacht zutretende Deckgebirgslösungen zu einem abweichenden Chemismus führen.

In den kleinen Verschlüssen in der Nähe der Einlagerungsfelder beeinflussen die erhöhten Temperaturen durch den radioaktiven Zerfall der Abfallinventare die Alterationsprozesse und können zudem zu thermomechanischen Spannungen führen.

Das *Bemessungserdbeben* ist als Auslegungsanforderung bei allen Streckenverschlüssen berücksichtigt worden. Eine wichtige Randbedingung für die Auslegung der Barrieren ist auch der *Fluidruck*, der in der frühen Nachverschlussphase neben dem Lösungszutritt aus dem Gebirge vor allem durch Grubenluft und Gasbildung bestimmt wird. Infolge Gasbildung durch Metallkorrosion wird es in den Querschlägen der Einlagerungsfelder vor den kleinen Streckenverschlüssen zu einem raschen Anstieg des Fluiddrucks kommen. Da die Barrieren nicht gasdicht sind, wird sich der Fluiddruck auch rasch in den anderen Teilen des Grubengebäudes und somit bis zu den großen Streckenverschlüssen ausbreiten. Die großen Streckenverschlüsse werden zudem vom Infrastrukturbereich aus mit Fluiddruck beaufschlagt, wobei hier der Fluiddruck vor allem von Gebirgslösungen und über den Schacht zutretenden Lösungen herrührt.

Die hydraulischen Eigenschaften der Kontaktzone und der *Auflockerungszone* werden durch die *Konvergenz*, den *Fluidruck* und das Quellen der Baustoffe beeinflusst. Ein hoher Fluidruck und ein verzögertes Aufsättigen und Quellen der Baustoffe können das Schließen der Risse in der Auflockerungszone verzögern oder verhindern.

Für den Versagensfall wird unterstellt, dass die integrale hydraulische Leitfähigkeit des Gesamtbauwerks (incl. Kontaktzone und Auflockerungszone) erhöht ist, wobei von den Einzelkomponenten der Verschlüsse kein Kredit genommen wird.

Auswirkungen auf die Systementwicklung

Im Folgenden werden die beeinflussten FEP für das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses diskutiert (Tab. 7.3). Sie bestimmen die Abweichungen des hier betrachteten Alternativszenariums vom Referenzszenarium.

Die stärksten Auswirkungen werden für dieses Alternativszenarium erwartet, wenn das Versagen eines großen Streckenverschlusses zu einem frühen Zeitpunkt erfolgt. Dann ist das Grubengebäude noch nicht vollständig mit Gebirgslösungen vollgelaufen und von der Dichtfunktion des Versatzes kann noch kein Kredit genommen werden. Zudem existiert zu diesem Zeitpunkt ein Firstspalt zwischen *Versatz* und *Streckenausbau*, der als bevorzugter Strömungspfad wirken kann. In diesem Fall können über den Schacht zugetretene Lösungen mit abweichendem Chemismus aus dem Infrastrukturbereich bis zu den kleinen Streckenverschlüssen an den Einlagerungsfeldern vordringen.

Umgekehrt könnten beim Versagen der kleinen Streckenverschlüsse an den Einlagerungsfeldern kontaminierte Lösungen und Gase rasch bis zu den großen Streckenverschlüssen am Infrastrukturbereich gelangen (*Strömungsvorgänge im Grubengebäude*).

In den defekten Streckenverschlüssen führt die erhöhte hydraulische Leitfähigkeit zu einer Intensivierung und einem Fortschreiten der Alteration in weiteren Bereichen des Bauwerks solange ausreichende Druckgradienten für einen Lösungsfluss vorhanden sind. Während an den Verschlüssen am Infrastrukturbereich die Alteration durch den abweichenden Chemismus der über den Schacht zutretenden Lösungen gefördert werden kann, wird die Intensität und die Reaktionsgeschwindigkeit der Alterationsprozesse in den Verschlüssen an den Einlagerungsfeldern durch die erhöhten Temperaturen (*Wärmestrom*) beeinflusst.

Die Strömungsvorgänge fördern zudem die Alteration durch einen Abtransport gelöster Stoffe und den Antransport neuer Lösungen. Infolge der Durchströmung der Barriere können auch Volumenänderungen von Baustoffen auftreten. Änderungen von Porositäten und Permeabilitäten führen zu abweichenden thermischen Eigenschaften und damit zu einer anderen *thermischen Expansion oder Kontraktion* der Baustoffe. Von erhöhten Temperaturen werden vor allem die kleinen Streckenverschlüsse in den Querschlägen der Einlagerungsfelder betroffen. Höhere Porositäten bieten auch Lebensraum für Mikroben, die wiederum zur Alteration der Barriere beitragen können (*Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude*).

Durch Änderungen der mechanischen Eigenschaften des Verschlusses ändert sich auch der Stützdruck auf die Streckenkontur. Dies hat Auswirkungen auf die Kontaktzone und die *Auflockerungszone* und deren hydraulischen Eigenschaften. *Spannungsumlagerungen* und die Schaffung von Hohlräumen durch Auflösungsprozesse können eine erneute *Konvergenz* initiieren.

Durch die erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten des Verschlusses ändern sich die Strömungsvorgänge und der Stofftransport (*Dispersion, Diffusion*) im Grubengebäude. So können Lösungen mit abweichendem Chemismus in das Grubengebäude eindringen bzw. kontaminierte Lösungen in den Infrastrukturbereich gelangen. Durch die erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten in den Streckenverschlüsselementen können zudem Fluiddruckdifferenzen auf den beiden Seiten der Streckenverschlüsse ausgeglichen werden.

Bewertung

Die alternative Ausprägung der spezifischen Annahme geht von einem vorzeitigen Versagen eines kompletten Streckenverschlusses aus und ist weniger wahrscheinlich. Bei der Ableitung des Bauwerksversagens bleibt der Aufbau insbesondere der großen, redundanten Streckenverschlüsse, bestehend aus 3 Widerlagern und 2 Dichtelementen, unberücksichtigt. Durch das Versagen eines Streckenverschlusses werden die hydraulischen Verhältnisse und damit die Lösungsbewegung im Grubengebäude verändert. Das Alternativszenarium kann daher durch eine erhöhte integrale Permeabilität eines Streckenverschlusses incl. Kontakt- und Auflockerungszone abgebildet werden. Als mögliche Werte der dabei anzusetzenden Permeabilität können solche für Auflockerungszonen, Risse oder poröse Medien mit größerer Porosität herangezogen werden. Die Permeabilität der Dichtelemente des Streckenverschlusses kann dabei gegenüber dem Referenzwert stark erhöht sein. Falls das vorzeitige Versagen des Streckenverschlusses durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerungszone abgebildet werden soll, ist auch das Verheilen dieser Auflockerungszone zu betrachten. Von diesem Alternativszenarium sind verschiedene Varianten zu betrachten, die sich auf den Standort und die Art des Streckenverschlusses beziehen: entweder ein großer Streckenverschluss am Übergang zum Infrastrukturbereich oder ein kleiner Streckenverschluss im Querschlag eines schachtnahen Einlagerungsfeldes.

Tab. 7.3: Durch das Vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses: beeinflusste FEP

Prozessgruppe	Beeinflusste FEP
Chemische / mikrobielle Prozesse	Alteration von Verschlussbauwerken
	Auflösung und Ausfällung
	Korrosion von Materialien mit Zementphasen
	Alteration von Tonmineralen
	Alteration von sonstigen Mineralen
	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude
Mechanische Prozesse	Konvergenz
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
	Thermische Expansion oder Kontraktion
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien
	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen
Thermische Prozesse	Wärmestrom
Hydraulische Prozesse	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
	Kanalisation in Dichtelementen
	Fluiddruck
	Kolloidbildung, -transport und -filtration
	Mechanische Dispersion
	Diffusion

Je nach Einwirkungen kann ein Streckenverschluss zu frühen oder späten Zeiten versagen. Ein frühes Versagen zu Beginn der Nachverschlussphase wird als abdeckender Fall im Hinblick auf die Konsequenzen für die Systementwicklung betrachtet. Ein anderer Zeitpunkt des Versagens kann ggf. untersucht werden falls sich aus den Ergebnissen der Analysen Hin-

weise auf eine Zeitabhängigkeit ergeben. Es wird erwartet, dass das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ abdeckend für andere Alternativszenarien ist, die methodisch anders abgeleitet werden und auf FEP basieren, die ebenfalls Einwirkungen auf die Streckenverschlüsse beschreiben. Dies trifft z. B. auf das weniger wahrscheinliche FEP "Kanalisation in Dichtelementen" zu. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung von Initial-FEP betrifft Änderungen des betrachteten Prozesses im gesamten Endlagersystem und wird daher nicht abgedeckt.

7.1.3 Alternative Betrachtung zur Funktion der Nahfeldbarrieren

7.1.3.1 Versagen von Nahfeldbarrieren durch unerkannte Fertigungs- und Errichtungsfehler

Da die Nahfeldbarrieren – entsprechend dem Endlagerkonzept – in großer Anzahl in das Endlager eingebracht werden (4.935 Bohrlochverschlüsse und Buffer, 14.810 Rückholbare Kokillen, 64.181 Innenliner-Segmente) kann aufgrund der Fehlerquoten in großtechnischen Fertigungs- und Kontrollverfahren nicht ausgeschlossen werden kann, dass eine geringe Anzahl von Barrieren-Komponenten bereits bei der Einbringung unerkannte Fertigungsfehler aufweist. Da das Versagen dieser Komponenten auf Fertigungsfehlern basiert, kann hier keine Ableitung der Eigenschaften der defekten Komponenten durch einwirkende FEP erfolgen. Für das Versagen können – entsprechend den Komponenten-spezifischen Anforderungen – folgende Fehlfunktionen unterstellt werden:

- *Bohrlochverschluss*, Dichtelement: erhöhte hydraulische Durchlässigkeit (früher Lösungszutritt zu den inneren Barrieren + Freisetzung ev. kontaminierter Lösungen), Quelldruck überschreitet die minimale Hauptspannung des Gebirges
- *Bohrlochverschluss*, oberes Widerlager: mechanisches Versagen > in der Folge Versagen des Dichtelementes
- *Buffer*: erhöhte hydraulische Durchlässigkeit (früher Lösungszutritt zum Innenliner + Freisetzung ev. kontaminierter Lösungen), reduzierte mechanische Stabilität (unzureichende Widerlagerfunktion für Bohrlochverschluss > Beeinträchtigung der Dichtfunktion)
- *Innenliner*: erhöhte hydraulische Durchlässigkeit (früher Lösungszutritt zur Kokille + Freisetzung ev. kontaminierter Lösungen), reduzierte mechanische Stabilität (keine Schutzfunktion für Rückholbare Kokille)
- *Rückholbare Kokille*: Undicht (Zutritt von Lösungen in das Behälterinnere + frühzeitige Freisetzung von Radionukliden)

Aus der Binomialverteilung ergibt sich für eine weniger wahrscheinliche Systementwicklung folgende Anzahl von Nahfeldkomponenten mit unerkannten Defekten:

- 32 Rückholbare Kokillen (19 RK mit Leistungsreaktor-BE, 4 RK mit Strukturteilen, 4 RK mit CSD-V und 5 RK mit CSD-C/B)
- 13 Innenliner-Segmente
- 8 Buffer
- 11 Bohrlochverschlüsse

Bei unterschiedlichen räumlichen Verteilungen der defekten Komponenten sind verschiedene Alternativszenarien denkbar.

Bei der Annahme, dass alle diese Defekte jeweils kombiniert in einem Bohrloch auftreten, würde dies bedeuten, dass in einer Einlagerungsstrecke die Nahfeldbarrieren aller Einlagerungsbohrlöcher (12) defekt sind und zudem in jedem Einlagerungsbohrloch 2-3 Behälter

undicht sind. Da die Innenliner eine Schutzfunktion für die Rückholbaren Kokillen haben, könnte ihr Versagen zudem das Versagen weiterer Behälter nach sich ziehen.

Bei einer Verteilung der Komponenten mit unerkannten Defekten über den gesamten Einlagerungsbereich ergibt sich – aufgrund der funktionalen Abhängigkeiten zwischen Bohrlochverschluss – Buffer – Innenliner – eine maximale Anzahl der defekten Nahfeldbarrieren aus der Summe dieser Komponenten (32).

Auswirkungen auf die Systementwicklung

Im Folgenden werden die beeinflussten FEP für das Versagen der Nahfeldbarrieren diskutiert. Hierfür werden in Tab. 7.3 die beeinflussten FEP aller 4 betroffenen Komponenten zusammengefasst. Sie bestimmen die Abweichungen der hier betrachteten Alternativszenarien vom Referenzszenarium.

Durch die geänderten Strömungsverhältnisse nach Versagen der Nahfeldbarrieren kann z. B. auch die Ausprägung verschiedener chemischer und mikrobieller Prozesse beeinflusst werden (vgl. Tab. 7.4). Der Abtransport gelöster Stoffe und der Antransport neuer Lösungen fördern die Alteration. In der Folge ändern sich die *hydrochemischen Verhältnisse* und somit wird auch die Entwicklung in anderen Teilen des Grubengebäudes beeinflusst. Die *Metallkorrosion* trägt wesentlich zur *Gasbildung* und damit zum *Fluiddruck* bei. Außerdem kann der gebildete Wasserstoff die *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme* verstärken. Der durch die Reaktionsprodukte der Metallkorrosion beeinflusste Lösungsschemismus kann zudem das Quellvermögen der Tone negativ beeinflussen. Die bei erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit vergrößerte Porosität von *Buffer* und *Bohrlochverschlüssen* begünstigt die Ausbreitung von Mikroben, die z. T. zur Alteration der Materialien beitragen (*mikrobielle Prozesse im Grubengebäude*).

Radiologische Prozesse sind vor allem für das direkte Umfeld der Rückholbaren Kokillen relevant und werden auch bei geänderten Randbedingungen nicht wesentlich von der Referenzentwicklung abweichen. Eine Ausnahme ist die wesentlich intensivere, frühzeitige *Radiounuklid-Mobilisierung* aufgrund der deutlich größeren Anzahl defekter Behälter.

Die Änderung der mechanischen Prozesse aufgrund einer reduzierten mechanischen Stabilität der Barrieren kann Auswirkungen auf die Entwicklung der Spannungsverhältnisse in der *Auflockerungszone* und im Gebirge haben. So kann ein reduzierter Stützdruck zu einem Wiederaufreißen von Rissen in der Auflockerungszone führen. Durch die erhöhte hydraulische Leitfähigkeit der Barrieren kann das Quellen der Baustoffe intensiviert werden. Falls der Quelldruck der Materialien die minimale Hauptspannung des Gebirges überschreitet, kann es zur Bildung von Rissen im Gebirge kommen.

Wärmestrom und thermomechanische Spannungen werden weitgehend der Referenzentwicklung entsprechen.

Das Versagen der Barrieren ist in allen Fällen an geänderte hydraulische Eigenschaften gekoppelt. Dies kann auch die Entstehung von Kanalisierungen im Buffer oder im Dichteelement des Bohrlochverschlusses fördern. Aufgrund dieser Eigenschaften werden sich die Strömungsverhältnisse im Nahfeld und in den angrenzenden Grubenräumen ändern. Dadurch werden auch der *Fluiddruck* und die Transportprozesse (*Kolloidtransport, Dispersion, Diffusion*) beeinflusst.

Tab. 7.4: Beeinflusste FEP der Initialbarrieren Bohrlochverschluss (BLV), Buffer (BUF), Innenliner (IL) und Rückholbare Kokillen (RK).

Prozessgruppe	Beeinflusste FEP	Initialbarriere
Chemische / mikrobielle Prozesse	Metallkorrosion	RK, IL
	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	RK, IL
	Alteration von Verschlussbauwerken	BUF, BLV
	Auflösung und Ausfällung	BUF, BLV
	Korrosion von Materialien mit Zementphasen	BLV
	Alteration von Tonmineralen	BUF, BLV
	Alteration von sonstigen Mineralen	BUF, BLV
	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	RK, IL, BUF, BLV
Radiologische Prozesse	Strahlungsinduzierte Aktivierung	RK, IL, BUF, BLV
	Radiolyse	RK, IL, BUF, BLV
	Radionuklid-Mobilisierung	RK
Mechanische Prozesse	Konvergenz	BUF, BLV
	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	RK, IL, BUF, BLV
	Thermische Expansion oder Kontraktion	RK, IL, BUF, BLV
	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	BLV
	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	BUF, BLV
Thermische Prozesse	Wärmestrom	IL, BUF, BLV
Hydraulische Prozesse	Strömungsvorgänge im Grubengebäude	BUF, BLV
	Kanalisation in Dichtelementen	BUF, BLV
	Fluiddruck	RK, IL, BUF, BLV
	Kolloidbildung, -transport und -filtration	BUF, BLV
	Mechanische Dispersion	BUF, BLV
	Diffusion	BUF, BLV

Bewertung

Das FEP geht von einem Versagen von Nahfeldbarrieren durch Fertigungsfehler unmittelbar nach Verschluss des Endlagers aus. Aufgrund der funktionalen Abhängigkeiten zwischen den Bohrlochverschlüssen, Buffer und Innenliner wird unterstellt, dass – falls eine dieser Komponenten einen unerkannten Defekt aufweist – die Funktion der Nahfeldbarrieren insgesamt nicht mehr gewährleistet ist. Eine Entwicklung mit dem Versagen von insgesamt 64 Komponenten (darunter 32 Behältern) wird aufgrund der vorgesehenen Qualitätssicherungsmaßnahmen als weniger wahrscheinlich angesehen.

Wesentliches Merkmal der defekten Nahfeldbarrieren sind erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten, die die Strömungs- und Fluiddruckverhältnisse sowie den Stofftransport im Grubengebäude beeinflussen. Für die Alternativszenarien ist ein Versagen der Behälterdichtungen und der Schweißnähte des Innenliners zu unterstellen. Für den Puffer können ebenfalls höhere

hydraulische Leitfähigkeiten (z. B. durch Rezepturfehler (höherer Sandanteil), Fugen zwischen Bentonitblöcken noch nicht geschlossen) angenommen werden. Für den Bohrlochverschluss ist eine erhöhte integrale Permeabilität des Dichtelementes incl. Kontakt- und Auflockerungszone zu unterstellen. Als mögliche Werte der dabei anzusetzenden Permeabilität können solche für Auflockerungszonen, Risse oder poröse Medien mit größerer Porosität herangezogen werden. Die Permeabilität des Dichtelementes des Bohrlochverschlusses kann dabei gegenüber dem Referenzwert stark erhöht sein. Wichtig ist außerdem eine mögliche Mobilisierung der Radionuklidinventare aus 32 Rückholbaren Kokillen.

Von diesem Alternativszenarium sind verschiedene Varianten zu betrachten, die sich auf die Verteilung und Kombination der defekten Komponenten der Nahfeldbarrieren beziehen. Dabei sind auch die verschiedenen Abfallarten zu berücksichtigen.

Es wird erwartet, dass das Alternativszenarium „Versagen von Nahfeldbarriere durch unerkannte Fertigungsfehler“ abdeckend für andere Alternativszenarien ist, die auf dem Versagen von einzelnen Komponenten der Nahfeldbarrieren basieren. Diese Szenarien können methodisch anders abgeleitet worden sein. So wird z. B. das weniger wahrscheinliche FEP *Kanalisation in Dichtelementen* – soweit es die Nahfeldbarrieren betrifft – durch das Alternativszenarium abgedeckt. Alternativszenarien aus der weniger wahrscheinlichen Ausprägung von Initial-FEP beziehen sich nicht auf ein Versagen durch Fertigungs- und Errichtungsfehler und werden daher nicht abgedeckt.

7.1.3.2 Vorzeitiges Versagen von Nahfeldbarrieren durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen

Wie bereits in Kap. 7.1.3.1 dargestellt, bestehen die Nahfeldbarrieren aus den 4 Initialbarrieren Rückholbare Kokillen, Innenliner, Buffer und Bohrlochverschluss. Die Rückholbaren Kokillen und die Innenliner sollen entsprechend der Bergbarkeitsanforderung der Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) eine Funktionsdauer von 500 a haben, während Buffer und Bohrlochverschlüsse als Langzeitbarrieren eine vorgesehene Funktionsdauer von 50.000 Jahren haben sollen (Lommerzheim & Jobmann 2015). Dementsprechend kann nach mehr als 500 Jahren nur noch von zwei Komponenten der Nahfeldbarrieren – dem *Buffer* und dem *Bohrlochverschluss* Kredit genommen werden.

Die Nahfeldbarrieren werden entsprechend den aktuellen *hydrochemischen Verhältnissen* im Endlager und unter Berücksichtigung der Bildung alterierter Lösungen durch Korrosionsprozesse an den Baustoffen ausgelegt. Ein vorzeitiges Versagen der Verschlüsse erfordert daher die Entstehung von Systemrandbedingungen, die von den Auslegungsannahmen signifikant abweichen. Derartige Randbedingungen können sich durch weniger wahrscheinliche Ausprägungen von einwirkenden FEP ergeben (vgl. Kap. 7.2.1).

Von den einwirkenden FEP sind die Alterations-FEP für die Funktion der Nahfeldbarrieren von besonderer Bedeutung. Neben den direkten Einwirkungen auf die jeweils unmittelbar betroffene Barriere (*Metallkorrosion* > *Rückholbare Kokille* + *Innenliner*, *Zementkorrosion* > *Widerlager Bohrlochverschluss*, *Alteration von Tonmineralen* > *Buffer* + *Dichtelement Bohrlochverschluss*) kann durch Änderungen der *hydrochemischen Verhältnisse* auch die Eigenschaften angrenzender Barrierekomponenten beeinflusst werden. Dies ist z. B. bei den Reaktionsprodukten der Metallkorrosion sowie der Zementkorrosion der Fall, die das Quellvermögen der Tone beeinflussen können.

Neben dem lithostatischen Druck ist das *Bemessungserdbeben* als Auslegungsanforderung bei allen geotechnischen Barrieren berücksichtigt worden. Eine wichtige hydraulische Randbedingung für die Auslegung der Barrieren ist auch der *Fluidruck*, der in den Nahfeldbarrieren vor allem durch die *Gasbildung* infolge *Metallkorrosion* bestimmt wird. Da in den Einlage-

rungsbereichen durch Behälter und Bohrlochausbau (Innen- und Außenliner) große Metallmengen konzentriert sind und durch die Gebirgsfeuchte immer ausreichend Wasser vorhanden ist, setzt die Metallkorrosion unmittelbar nach der Einlagerung ein. Daher wird es zu einem raschen Anstieg des Fluiddrucks in den Nahfeldbarrieren kommen. Der Druckaufbau ergibt sich aus dem Verhältnis von Gasbildungsrate zur Gasdurchlässigkeit der Barrieren.

In diesem Zusammenhang müssen auch die hydraulischen Eigenschaften der Kontaktzone und der *Auflockerungszone* betrachtet werden, die durch die *Konvergenz*, den *Fluiddruck* und das Quellen der Baustoffe beeinflusst werden. Ein hoher Fluiddruck sowie ein verzögertes Aufsättigen und Quellen der Baustoffe können das Schließen der Risse in der Auflockerungszone verzögern oder verhindern.

Analog zur Diskussion in Kap. 7.1.3.1 wird aufgrund der funktionalen Abhängigkeiten zwischen den Nahfeldbarrieren-Komponenten unterstellt, dass bei Versagen einer Komponente auch die Funktion der anderen Komponenten beeinträchtigt wird, so dass letztendlich für den Versagensfall unterstellt wird, dass die integrale hydraulische Leitfähigkeit des Gesamtbauwerks (incl. Kontaktzone und Auflockerungszone) erhöht ist.

Auswirkungen auf die Systementwicklung

Die durch ein Barrierenversagen beeinflussten FEP wurden bereits in Kap. 7.1.3.1 beschrieben (vgl. auch Tab. 7.4). Auf dieser Beschreibung wird hier verwiesen. Die Ausprägung der beeinflussten FEP kann aber in Abhängigkeit von den Eigenschaften der defekten Barrieren (hängen davon, welches einwirkende FEP zum Versagen geführt hat) variieren.

Bewertung der alternativen Annahme

Im Unterschied zum Barrierenversagen durch unerkannte Fertigungs- und Errichtungsfehler, bei dem pauschal ohne Spezifizierung erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten unterstellt werden, sollten bei einem Versagen durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen die Ausprägungen der jeweils auslösenden FEP betrachtet werden, da sich hieraus unterschiedliche Eigenschaften der defekten Barrieren ergeben. Dies setzt aber entsprechende Prozessanalysen voraus. Da ein breites Spektrum sehr unterschiedlicher Prozesse zu einem Versagen führen kann, sind auch keine Aussagen zu Versagenszeitpunkt möglich.

Weiterhin können hier – im Unterschied zum Versagen durch unerkannte Fertigungs- und Errichtungsfehler, wo aufgrund bekannter Fehlerquoten in Fertigungs- und Kontrollverfahren eine statistische Abschätzung von Versagenshäufigkeiten möglich ist – keine vergleichbaren statistischen Aussagen zur Versagenshäufigkeit gemacht werden, da die Randbedingungen unbekannt sind. Diese Randbedingungen werden u. a. durch die Initial-FEP definiert und müssen durch Prozessanalysen abgeleitet werden.

Daher werden die Alternativszenarien für das vorzeitige Versagen von Nahfeldbarrieren durch auslegungsüberschreitende Einwirkungen nicht hier durch den Ansatz "Alternative zu einer spezifischen Annahme" abgeleitet, sondern über die "weniger wahrscheinliche Ausprägung von Initial-FEP".

7.2 Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP

In diesem Kapitel wird die Entwicklung von Alternativszenarien unter Berücksichtigung von weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der im Referenzszenarium betrachteten 14 Initial-FEP (Tab. 3.1) dargestellt. Die dabei angewandte methodische Vorgehensweise kann wie folgt zusammengefasst werden:

Alle Daten zur Charakterisierung der Initial-FEP und zu den beeinträchtigten Initial-Barrieren können dem FEP-Katalog entnommen werden. Hier finden sich auch die Quellenangaben und Verweise. Für die Initial-FEP werden jeweils die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen festgelegt und die daraus resultierenden Abweichungen vom Referenzszenarium beschrieben. Sollten sich keine oder nicht relevante Abweichungen ergeben, so ist für dieses FEP kein Alternativszenarium zu betrachten. Für den Fall, dass sich signifikante Abweichungen vom Referenzszenarium ergeben, werden die direkt beeinflussten FEP genannt und die wichtigsten Auswirkungen auf diese kurz zusammengefasst.

Prinzipiell ergibt sich aus jedem Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung ein zusätzliches Alternativszenarium. Dies ist nicht der Fall falls:

- mehrere Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen Auswirkungen vergleichbarer Art auf die beeinflussten FEP haben. In diesem Fall werden die entsprechenden Alternativszenarien zu einer Gruppe zusammengefasst und bei dem jeweiligen FEP wird auf das entsprechende repräsentative Alternativszenarium verwiesen. Ein Beispiel für diesen Fall sind die beiden FEP *Metallkorrosion* und *Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme*, die beide auf die *Rückholbare Kokille* einwirken. Das Alternativszenarium kann für beide FEP zusammengefasst und beim FEP *Metallkorrosion* beschrieben werden.
- Die Auswirkungen eines Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen entsprechen denjenigen einer alternativen Ausprägung einer spezifischen Annahme. In diesem Fall werden die entsprechenden Alternativszenarien zu einer Gruppe zusammengefasst und bei dem jeweiligen FEP wird auf das entsprechende repräsentative Alternativszenarium verwiesen. Ein Beispiel für diesen Fall ist das FEP *Lageverschiebung des Schachtverschlusses*, das in seiner weniger wahrscheinlichen Ausprägung im Alternativszenario "Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses" (vgl. Kap. 7.1.2.1) betrachtet wird.

Jedes nach der genannten Vorgehensweise abgeleitete Alternativszenarium ist aufgrund der weniger wahrscheinlichen Ausprägung der Initial-FEP als weniger wahrscheinliches Szenarium einzustufen.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise exemplarisch für das Initial-FEP *Alteration von Tonmineralen* dargestellt.

7.2.1 Alteration von Tonmineralen

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung der *Alteration von Tonmineralen* wird betrachtet, dass aufgrund abweichender Eigenschaften der Zustände sowie der Intensität der Prozesse bei den einwirkenden FEP *Verschlussmaterial*, *Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau*, *Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude*, *Wärmestrom* und *Sorption und Desorption* die Tonminerale in Initial-Barrieren *Buffer*, *Bohrlochverschlüsse*, *Streckenverschlüsse* und *Untere Schachtverschlüsse* die Tonminerale stärker alterieren werden. Dadurch entspricht das Verhalten dieser Initial-Barrieren nicht dem bei der Auslegung angenommenen Verhalten und ihre Permeabilität nicht dem Auslegungswert. Die Ausprägung kann bedingt durch variierende hydrochemische Verhältnisse lokal unterschiedlich sein.

Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau

Die hydrochemischen Verhältnisse ergeben sich aus den eingebrachten Materialien, den Fluiden im Grubenbau sowie den ablaufenden chemischen Prozessen. Im Nahfeld können die hydrochemischen Verhältnisse lokal stark variieren. Weniger wahrscheinliche Ausprägungen können für die hydrochemischen Verhältnisse jedoch nicht direkt angegeben werden. Vielmehr sind diese durch Systemanalysen aus der Bandbreite von Ungewissheiten

über die Mengen, die Zusammensetzung und die Verteilung der eingebrachten Stoffe zu bestimmen. Entsprechende hydrochemische Verhältnisse können die im Folgenden genannten Prozesse beeinflussen und sind dort zu berücksichtigen.

Auflösung und Ausfällung

Die quantitativen und qualitativen Ausprägungen des FEP *Auflösung und Ausfällung* können mit Hilfe von Rechenprogrammen eingeschätzt werden und sind mit den Eigenschaften der Zustände *Verschlussmaterial* (der Stoffbestand), *Buffer* (das Porenraumvolumen), *Bohrlochverschlüsse* (das Porenraumvolumen), *Streckenverschlüsse* (das Porenraumvolumen), *Untere Schachtverschlüsse* (das Porenraumvolumen) und *Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau* (die Lösungszusammensetzung, die Löslichkeitsgrenzen) sowie mit der Intensität des *Wärmestroms* (Beeinflussung von Löslichkeitsgrenzen und der Geschwindigkeit des Prozesses) eng verknüpft. Für dieses FEP kann weder eine wahrscheinliche, noch eine weniger wahrscheinliche Ausprägung festgelegt werden.

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude

Die quantitativen und qualitativen Ausprägungen des FEP *Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude* müssen mit Hilfe von Modellrechnungen abgeschätzt werden und sind mit den Eigenschaften des *Versatzes* (erhöhtes Porenraumvolumen, der Stoffbestand), des *Verschlussmaterials* (der Stoffbestand), der *Sandverfüllung* (erhöhtes Porenraumvolumen), des *Inventars: Metalle* (der Stoffbestand), des *Inventars: Organika* (der Stoffbestand), des *Buffers* (das Porenraumvolumen), der *Bohrlochverschlüsse* (das Porenraumvolumen), der *Streckenverschlüsse* (das Porenraumvolumen), der *Unteren Schachtverschlüsse* (das Porenraumvolumen), der *Gasmenge im Grubenbau* (der Stoffbestand), der *Auflockerungszone und ungesättigten Zone* (erhöhtes Porenraumvolumen, der Stoffbestand), der *Hydrochemischen Verhältnisse im Grubenbau* (der Stoffbestand, die Wasseraktivität und der Salzgehalt) sowie mit der Intensität der Prozesse *Konvergenz* (erhöhtes Porenraumvolumen), *Kolloidbildung*, *-transport und -filtration* (der Transport von Mikroben innerhalb des Grubengebäudes) und *Wärmestrom* (die Umgebungstemperatur) eng verknüpft.

Durch die weniger wahrscheinliche Ausprägungen dieser einwirkenden FEP werden die *Mikrobiellen Prozesse im Grubengebäude* auch nach dem Abklingen der *Konvergenz* im Grubengebäude, dem Wiederherstellen des ursprünglichen thermo-hydraulisch-mechanischen Zustandes in der *Auflockerungszone und ungesättigten Zone* und dem entsprechenden Anpassen der Verhältnisse im restlichen Grubengebäude an diejenigen im Wirtsgestein und im Nebengebirge in deutlich höherer Intensität als im umliegenden Wirtsgestein und Nebengebirge ablaufen.

Wärmestrom

Die quantitativen und qualitativen Ausprägungen des FEP *Wärmestrom* können mit Hilfe von THM Rechenprogrammen eingeschätzt werden und sind mit den Wärmestrom-relevanten Eigenschaften der Zustände *Sandverfüllung*, *Verschlussmaterial*, *Buffer*, *Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau*, *Auflockerungszone und ungesättigte Zone*, *Wirtsgestein* und *Hydrochemische Verhältnisse im Wirtsgestein* sowie mit der Intensität der Prozesse *Strömungsvorgänge im Grubengebäude*, *Strömungsvorgänge im Wirtsgestein*, *Radioaktiver Zerfall* und *Globale klimatische Veränderungen* eng verknüpft.

Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird betrachtet, dass – bedingt durch weniger wahrscheinliche Ausprägungen dieser einwirkenden FEP (mit einer Ausnahme des FEP *Radioaktiver Zerfall*, für das keine weniger wahrscheinliche Ausprägung anzunehmen ist) – der erhöhte *Wärmestrom* durch den *radioaktiven Zerfall* der Abfälle während der ersten wenigen Tausend Jahren geringer ist als im Referenzszenarium angenommen. Dadurch erfolgt eine verzögerte Annäherung des *Wärmestroms* an die ursprünglichen Temperaturen in Einlagerungsniveau, die durch die Erdwärme und – in geringerem Maße – durch die *Globalen klimatischen Veränderungen* bestimmt werden.

Radiolyse

Für den Prozess der Radiolyse ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung anzunehmen, die über den Einfluss der bereits berücksichtigten weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP *Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau* (die Lösungszusammensetzung) hinausgeht.

Sorption und Desorption

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Sorption und Desorption* ergibt sich aus den bereits berücksichtigten weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP *Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau* (die Lösungszusammensetzung, pH) und *Wärmestrom* (Temperatureinfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit).

7.2.2 Auswirkungen auf die Systementwicklung und Bewertung des FEP**Beeinflusste FEP**

Die Auswirkungen auf die Systementwicklung leiten sich aus den beeinflussten FEP des FEP *Alteration von Tonmineralen* ab (Tab. 7.5).

Tab. 7.5 Durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP *Alteration von Tonmineralen* beeinflusste FEP

Prozessgruppe	Beeinflusste FEP	
Geotechnische Barrieren	Verschlussmaterial	
	Untere Schachtverschlüsse	Initialbarriere
	Streckenverschlüsse	Initialbarriere
	Buffer	Initialbarriere
	Bohrlochverschlüsse	Initialbarriere
Geologische Komponenten	Auflockerungszone und ungesättigte Zone	
	Wirtsgestein	Initialbarriere
Zustand Grubengebäude	Lösungsmengen im Grubenbau	
Chemische / mikrobielle Prozesse	Alteration von Verschlussbauwerken	Initial-FEP
	Alteration von Versatz	
	Hydrochemische Verhältnisse im Grubengebäude	
	Hydrochemische Verhältnisse im Wirtsgestein	
	Sorption und Desorption	
	Kolloidbildung, -transport und -filtration	
	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	
Mechanische Prozesse	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Initial-FEP
	Lageverschiebung von Schachtverschlusselementen	Initial-FEP

So können die endlagerrelevanten Eigenschaften des *Verschlussmaterials*, das teilweise aus Tonmineralen besteht, durch eine verstärkte *Alteration von Tonmineralen* negativ beeinflusst werden. Dies kann Auswirkungen auf die Funktion der Verschlussbauwerke haben.

Die Funktionstüchtigkeit der *Unteren Schachtverschlüsse*, *Streckenverschlüsse* und *Bohrlochverschlüsse*, deren Dichtelemente aus Tonmineralen bestehen, wird durch eine verstärkte *Alteration von Tonmineralen* und damit einhergehende Verminderung der Plastizität und Quellfähigkeit negativ beeinflusst. Dadurch können die Verschlussbauwerke die angenommene Dichtewirkung nicht im erwarteten vollen Maße entwickeln.

Der *Buffer* besteht ebenfalls aus einem Ton-/Sandgemisch, so dass die Plastizität, Quellfähigkeit und Sorptionsfähigkeit durch eine *Alteration der Tonminerale* negativ beeinflusst werden kann.

Weiterhin trägt die *Alteration von Tonmineralen* zur *Alteration von Verschlussbauwerken* und zur *Alteration von Versatz* bei. Dadurch können die Dicht- und Rückhaltewirkung der Verschlussbauwerke bzw. Stütz- und Dichtwirkung des Versatzes beeinträchtigt werden.

Bei einer Auflösung von Tonmineralen ändert sich das Volumen des Materials (*Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien*).

Da die *Alteration von Tonmineralen* das Quellvermögen und damit die Einspannung der Dichtelemente in den Schächten beeinträchtigt werden, so dass es zu stärkeren *Lageverschiebungen von Schachtverschlusselementen* als im Referenzszenario kommen kann.

Da die *Alteration von Tonmineralen* mit Mineralumbildungen und -neubildungen verbunden ist, kann die verstärkte Freisetzung des Zwischenschichtwassers (Hydratationswasser der Zwischenschichtkationen und der Tonmineraloberfläche) und Strukturwassers (OH-Gruppen in der Mineralstruktur, die bei einer Auflösung zu Wassermolekülen kombinieren) die *Lösungsmengen im Grubenbau* im Vergleich zum Referenzszenarium erhöhen.

Die *Alteration von Tonmineralen* beeinflusst die *hydrochemischen Verhältnisse im Grubenbau* und *Wirtsgestein* indem einerseits Stoffe aus der Lösung verbraucht werden und andererseits als Reaktionsprodukte Stoffe freigesetzt werden.

Mineralumbildungen und -neubildungen ändern die mechanischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften der *Auflockerungszone und ungesättigten Zone* und können eine verzögerte Annäherung dieser Eigenschaften an den ursprünglichen Zustand des unverritzten Gebirges verursachen.

Das Wirtsgestein kann nur randlich durch Alterationsprozesse betroffen werden, wobei in diesen Bereichen die mechanischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften beeinflusst werden.

Weiterhin können transportrelevante Prozesse (*Sorption und Desorption, Kolloidbildung, -transport und -filtration*) von der *Alteration von Tonmineralen* betroffen sein. So kann die Mineralumbildung und -neubildung zu einem Rückgang der Sorptionsfähigkeit und einer Desorption der adsorbierten Ionen führen. Außerdem vermindert sich der Anteil an Tonminerkolloiden, während sich gleichzeitig der Anteil an Kolloiden von sonstigen Mineralen vergrößert.

Bewertung des FEP

Die Alteration von Tonmineralen in weniger wahrscheinlicher Ausprägung kann zu einer deutlich verminderten Quelfähigkeit des tonigen Verschlussmaterials führen und damit das Erreichen einer geringen hydraulischen Durchlässigkeit in Verschlussbauwerken durch das Quellen des Verschlussmaterials verhindern. Dadurch wird die hydraulische Leitfähigkeit in den Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschlüssen möglicherweise nicht, wie vorgesehen, in der Nachverschlussphase ähnliche Werte wie im Wirtsgestein annehmen. Aufgrund dieser Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit dieser Initial-Barrieren ist diese Entwicklung in mehreren Alternativszenarien zu betrachten.

Eine Verminderung – im konservativen Fall ein Verlust – der Quelfähigkeit des tonigen Verschlussmaterials wird dazu führen, dass die Porosität und die Permeabilität dieser Verschlussbauwerke zwischen den Einbau- und Zielwerten liegen und im konservativen Fall den Einbauwerten gleich sein werden. Es ist durch Prozessanalysen zu ermitteln, inwieweit und in welchem Zeitrahmen die Auswirkungen der Konvergenz diesen negativen Einfluss der Alteration von Tonmineralen in weniger wahrscheinlicher Ausprägung kompensieren können. Solange die Permeabilität der Initial-Barrieren Untere Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Buffer und Bohrlochverschlüsse diejenige des Wirtsgesteins übersteigt, kann ihr Porenraum bevorzugte Migrationspfade für gelöste Radionuklide darstellen.

7.3 Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes

Zur Festlegung des Referenzszenariums werden neben den FEP mit direkter Beeinträchtigung der Initial-Barrieren zusätzlich die *FEP Radionuklidmobilisierung*, *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* und *Radionuklidtransport in der Gasphase* sowie ihre einwirkenden FEP betrachtet. Im Folgenden werden die zu berücksichtigenden alternativen Entwicklungsmöglichkeiten, die sich aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Initial-FEP in Wechselwirkung mit den o. g. FEP ergeben, dargestellt.

Eine Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes per se kann nicht angegeben werden und somit auch keine weniger wahrscheinliche Ausprägung. Diese werden im Rahmen von Konsequenzenanalysen ermittelt. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransport ergibt sich in Abweichung von der wahrscheinlichen Ausprägung (siehe Kap. 6.2.1 und 6.2.2) aus der weniger wahrscheinlichen Ausprägung seiner beeinflussenden FEP. Bezüglich des Radionuklidtransportes haben die eigentlichen physikalischen Transportprozesse selbst keine weniger wahrscheinliche Ausprägung. Eine weniger wahrscheinliche Ausprägung kann sich aus den Randbedingungen wie z. B. den hydrochemischen Verhältnissen und den Materialien ergeben. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung von Initialbarrieren wird nur berücksichtigt, wenn sie nicht auf eine weniger wahrscheinliche Ausprägung der Initial-FEP zurückzuführen ist. Diese werden gesondert betrachtet.

7.3.1 Radionuklidmobilisierung

Inventar: Radionuklide

Eine eventuelle Ungewissheit über das eingelagerte Inventar der Radionuklide in das Endlager ist im Referenzszenario zu berücksichtigen. Für das Inventar der Radionuklide ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung über die Ungewissheiten bzw. Bandbreiten im Referenzszenario hinaus maßgeblich, da die Ungewissheiten bereits zum Zeitpunkt der Einlagerung quantifiziert werden können. Eine zukünftige Entwicklung ist dabei nicht zu betrachten.

Eine weniger wahrscheinliche Ausprägung hinsichtlich des Inventars ist denkbar im Hinblick auf die chemische Form, in der die Radionuklide im Abfall vorliegen. Ein Beispiel hierfür ist der Anteil an gasförmigen bzw. leicht zu mobilisierenden Radionukliden. Solche weniger wahrscheinlichen Ausprägungen sind zu berücksichtigen.

Rückholbare Kokillen

Durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Initial-FEP wird die auf externe Prozesse zurückzuführende weniger wahrscheinliche Ausprägung der Rückholbaren Kokille bereits berücksichtigt. Als weniger wahrscheinliche Ausprägung im Hinblick auf die Mobilisierung ist damit nur noch die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Anzahl der Behälter mit initialen Defekten zu betrachten. Die weniger wahrscheinliche Anzahl ist zu berücksichtigen. Diese sind: 19 Rückholbare Kokillen mit Leistungsreaktor-BE, 4 Rückholbare Kokillen mit Strukturteilen, 4 Rückholbare Kokillen mit CSD-V und 5 Rückholbare Kokillen mit CSD-C/B.

Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau

Die hydrochemischen Verhältnisse ergeben sich aus den eingebrachten Materialien, den Fluiden im Grubenbau sowie den ablaufenden chemischen Prozessen. Im Nahfeld können die hydrochemischen Verhältnisse lokal stark variieren. Weniger wahrscheinliche Ausprägungen können für die hydrochemischen Verhältnisse jedoch nicht direkt angegeben werden. Vielmehr sind diese durch Systemanalysen aus der Bandbreite der Ungewissheiten in Bezug auf die Mengen, die Zusammensetzung und die Verteilung der eingebrachten Stoffe zu bestimmen. Entsprechende hydrochemische Verhältnisse können eine Vielzahl der im Weiteren genannten Prozesse beeinflussen und sind dort zu berücksichtigen.

Metallkorrosion

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Metallkorrosion ergeben sich in erster Linie aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der hydrochemischen Verhältnisse und der Eigenschaften der Abfallmatrices. Für die Metallkorrosion sind daher weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Korrosionsrate der metallischen Abfallmatrices anzunehmen.

Korrosion der Brennstoffmatrix

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Korrosion der Brennstoffmatrix ergeben sich in erster Linie aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der hydrochemischen Verhältnisse und der Eigenschaften der Brennstoffmatrix. Für die Korrosion der Brennstoffmatrix sind daher weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Korrosionsrate der Brennstoffmatrix anzunehmen.

Korrosion von Glas

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Korrosion von Glas ergeben sich in erster Linie aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der hydrochemischen Verhältnisse und der Eigenschaften der Glasmatrix. Für die Korrosion von Glas sind daher weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Eigenschaften der Glasmatrix, wie z. B. der Korrosionsrate, oder der verfügbaren Oberfläche anzunehmen.

Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme ergeben sich vor allem aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der vorhandenen Gasmengen im Grubenbau und den hydrochemischen Verhältnissen. Für die Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme ist daher eine weniger wahrscheinliche Aus-

prägung der vorhandenen Wasserstoffmenge anzunehmen. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der hydrochemischen Verhältnisse wird bereits direkt berücksichtigt.

Zersetzung von Organika

Hinsichtlich der weniger wahrscheinlichen Ausprägung der Zersetzung von Organika sind lediglich organische Anteile in den Abfällen zu betrachten. Dabei kann es sich um originäre Abfallbestandteile, aber auch um aktivierte Materialien handeln, die zur Abschirmung in den Behältern eingebracht werden. Weniger wahrscheinliche Ausprägungen ergeben sich in erster Linie aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Materialeigenschaften dieser Organika, des Wärmestroms, der die Temperatur in der Umgebung der Abfälle definiert und den hydrochemischen Verhältnissen. Es sind daher weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Zersetzungsrate als Folge anderer Materialeigenschaften und einer anderen Temperatur anzunehmen.

Radioaktiver Zerfall

Für den physikalischen Prozess des radioaktiven Zerfalls ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung anzunehmen.

Sorption und Desorption

Bezüglich der Radionuklidmobilisierung betrifft Sorption und Desorption nur die im Behälter auf den Oberflächen sorbiert eingelagerten Radionuklide. Daher werden keine beeinflussenden Prozesse, sondern nur die zur Sorption verfügbaren Oberflächen im Abfallbehälter im Hinblick auf die Sorption und Desorption betrachtet. Ungewissheiten bezüglich der Oberflächen im Abfallbehälter sind im Referenzszenario zu berücksichtigen. Eine zukünftige Entwicklung ist dabei nicht zu betrachten. Über diese im Referenzszenario zu betrachtende Ungewissheit ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung zu berücksichtigen.

7.3.2 Radionuklidtransport

Radioaktiver Zerfall

Für den physikalischen Prozess des radioaktiven Zerfalls ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung anzunehmen.

Kolloidbildung, -transport und -filtration

Für die Kolloidbildung, -transport und -filtration sind weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Eigenschaften aller technischen Komponenten, der Auflockerungszone und des Nebengebirges bezüglich der Kolloidbildung und der Kolloidfiltration zu betrachten, sowie weniger wahrscheinliche Ausprägungen der hydrochemischen Verhältnisse im Hinblick auf die Stabilität der Kolloide.

Advektion

Entscheidend für die Advektion sind die Strömungsprozesse im betrachteten Teilsystem. Die Ausprägung der Advektion ist jeweils direkt auf die Ausprägung der Strömung zurückzuführen. Für die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Strömungsprozesse sind weniger wahrscheinliche Ausprägungen für den Fluiddruck und die Permeabilität aller in das Endlager eingebrachten Komponenten, der Auflockerungszone, des Wirtsgesteins und des Nebengebirges zu berücksichtigen. Für den Fluiddruck kann keine weniger wahrscheinliche Ausprägung angegeben werden. Diese ist durch Systemanalysen zu ermitteln. Als weniger

wahrscheinliche Ausprägung der Permeabilität der Komponenten und des Gebirges können höhere Permeabilitäten unterstellt werden.

Mechanische Dispersion

Entscheidend für die Mechanische Dispersion sind die Strömungsprozesse im betrachteten Teilsystem. Die Ausprägung der Mechanischen Dispersion ist jeweils direkt auf die Ausprägung der Strömung zurückzuführen. Für die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Strömungsprozesse sind weniger wahrscheinliche Ausprägungen für die Dispersionslänge aller in das Endlager eingebrachter Materialien, der Auflockerungszone, des Wirtsgesteins und des Nebengebirges zu berücksichtigen.

Diffusion

Der physikalische Prozess der Diffusion per se hat keine weniger wahrscheinliche Ausprägung. Im Hinblick auf den Radionuklidtransport ist allerdings der Einfluss einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung des Einflusses der Materialien auf die Diffusionsgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Für die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Diffusion sind weniger wahrscheinliche Ausprägungen für den Diffusionskoeffizienten für Radionuklide in allen in das Endlager eingebrachten Materialien, des Wirtsgesteins und der Gesteine im Nebengebirge zu berücksichtigen.

Sorption und Desorption

Im Hinblick auf die weniger wahrscheinliche Ausprägung der Sorption und Desorption ist in erster Linie die Materialzusammensetzung der zur Sorption zur Verfügung stehenden Oberflächen, die hydrochemischen Eigenschaften der Lösung und die chemischen Eigenschaften der transportierten Radionuklide zu betrachten. Hinsichtlich der Materialien und Oberflächen sind weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Sorptionseigenschaften aller in das Endlager eingebrachter Materialien, des Wirtsgesteins und der Gesteine im Nebengebirge zu berücksichtigen. Diese berücksichtigen auch die weniger wahrscheinliche Ausprägung der chemischen Eigenschaften der transportierten Radionuklide

7.3.3 Auswirkungen auf die Systementwicklung und Bewertung des FEP

Die FEP *Radionuklidmobilisierung*, *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* und *Radionuklidtransport in der Gasphase* beeinflussen geringfügig die hydrochemischen Verhältnisse in den verschiedenen Teilsystemen. Durch die verfügbaren Radionuklide wird außerdem die Sorption beeinflusst. Die Transportprozesse in Lösung und Gas beeinflussen sich gegenseitig.

Aufgrund der besonderen Relevanz der Radionuklide sind die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der RN-Mobilisierung und Transport-FEP in einem Alternativszenarium zu untersuchen.

Tab. 7.6 Durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung der FEP *Radionuklidmobilisierung* (RnMo), *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* (RnFl) und *Radionuklidtransport in der Gasphase* (RnG) beeinflusste FEP

Zustand- / Prozess- gruppe	Beeinflusste FEP	Einwirkende FEP
Chemische Zustände / Prozesse	Hydrochemische Verhältnisse im Grubengebäude	RnMo, RnFl, RnG
	Hydrochemische Verhältnisse im Wirtsgestein	RnMo, RnFl
	Hydrochemische Verhältnisse im Nebengebirge	RnMo, RnFl
	Sorption und Desorption	RnMo, RnFl
Transport-Prozesse	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	RnG
	Radionuklidtransport in der Gasphase	RnFl

7.4 Weniger wahrscheinliche FEP

Im FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell Nord wurden 3 weniger wahrscheinliche FEP identifiziert:

- Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
- Kanalisierungen in Dichtelementen
- Gas-Fracs im Wirtsgestein

Zur Ableitung von Alternativszenarien aufgrund dieser FEP werden zunächst die einwirkenden FEP kurz beschrieben. Hieraus ergeben sich Anhaltspunkte für die Ausprägung des jeweiligen FEP. Anschließend werden – an Hand der beeinflussten FEP – die Auswirkungen des weniger wahrscheinlichen FEP auf die Systementwicklung analysiert. Aus den Ergebnissen wird entweder ein Alternativszenarium abgeleitet oder darauf hingewiesen, in welcher Form diese Ergebnisse im Rahmen der bereits abgeleiteten Szenarien zu behandeln sind. Die Vorgehensweise wird im Folgenden exemplarisch an dem FEP Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen demonstriert.

7.4.1 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Erkundungsbohrungen sind wie die Grubenbaue des Endlagerbergwerks anthropogene Eingriffe in das Wirtsgestein oder das Nebengebirge. Sofern sie mit dem Grubengebäude des Endlagers direkt verbunden sind, werden sie als Teil des Grubengebäudes betrachtet.

Es wird erwartet, dass verschiedene Typen von Erkundungsbohrungen mit unterschiedlicher Zielsetzung vorhanden sind. Neben den Bohrungen zur Erkundung des Endlagerstandortes sind frühere Bohrungen, z. B. mit dem Ziel der KWS-Exploration, Geothermie oder Hydrogeologie, zu berücksichtigen. Bohrungen zur Erkundung des Endlagerstandortes von über Tage dienen vorrangig der hydrogeologischen sowie geologischen Erkundung des Nebengebirges. Einige Bohrungen werden auch das Wirtsgestein am Standort durchteufen, um eine erste geologische Charakterisierung zu ermöglichen. Die Einlagerungsbereiche werden mit einem ausreichenden Abstand zu den Altbohrungen eingerichtet. Es wird angenommen, dass alle übertägigen Bohrungen nicht in potentielle Einlagerungsbereiche reichen. Von unter Tage, vom Grubengebäude aus, werden Erkundungsbohrungen gestoßen, um detaillierte Informationen über die Schichtenfolge des Wirtsgesteins zu erlangen. Im Referenzszenarium werden alle Arten von Erkundungsbohrungen in der Nachverschlussphase als anforderungsgerecht erfüllt angesehen.

Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen im Umfeld der Strecken und des Infrastrukturbereichs vom Grubengebäude wirken direkt auf die hydraulische Integrität der Barriere Wirtsgestein. Erkundungsbohrungen sind in allen Teilsystemen, mit Ausnahme des Nahfeldes, zu berücksichtigen, da sich Bohrungen im Nebengebirge, Wirtsgestein und den Strecken und Schächten befinden bzw. von ihnen ausgehen. Bohrungen von über Tage sind in den Teilsystemen Nebengebirge und Wirtsgestein, Bohrungen von unter Tage im Teilsystem Strecken und Schächte (Grubengebäude) zu betrachten.

Für die Funktionalität der Bohrlochverfüllung ist es entscheidend, dass das Verfüllmaterial über eine den Standortbedingungen entsprechende Porosität und Permeabilität sowie mechanische Festigkeit, Steifigkeit und chemische Stabilität verfügt. Falls dies nicht gegeben ist, kann es lokal zu Ausspülungen und zu mechanischen Instabilitäten kommen. Dies kann auch passieren, wenn es zu ungleichmäßigen Setzungen oder Quellen kommt, und so Schwächezonen entstehen. Im Folgenden wird angenommen, dass in einer Erkundungsbohrung eine Wegsamkeit auftritt. Die möglichen Gründe für die Entstehung von Wegsamkeiten sind im FEP-Katalog unter „Sachlage im Endlagerstandortmodell“ aufgeführt und nicht durch Abhängigkeiten im FEP-Katalog abgebildet. Es wurden die folgenden Prozesse identifiziert, die aufgrund einer vom Referenzszenarium abweichenden Ausprägung zu Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen führen:

- *Konvergenz*: Eine signifikant verringerte Konvergenz kann zu einem unzureichenden Verschluss der Bohrung führen.
- *Fluidruck*: Vorhandene Wegsamkeiten (Diskontinuitäten) können bei hohem Fluidruck hydraulisch wirksam werden.
- *Metallkorrosion*: Gasbildung infolge von Metallkorrosion von eventuell noch im Bohrloch vorhandenen Metallteilen kann zur Bildung von Wegsamkeiten führen.
- *Korrosion von Materialien mit Zementphasen*: Durch die Korrosion von Zementhaltigen Verfüllmaterialien in Erkundungsbohrungen kann es zu Volumenänderungen und zur Entstehung einer zusätzlichen effektiven Porosität kommen. In der Folge wird sich auch die hydraulische Durchlässigkeit verändern.
- *Alteration von Tonmineralen*: Die Funktionstüchtigkeit von Versiegelungsmaterialien wie Tonpellets wird durch die Alteration von Tonmineralen beeinflusst.
- *Alteration von sonstigen Mineralen*: Die Funktionstüchtigkeit von Versiegelungsmaterialien wie Baryt wird durch die Alteration des Baryts beeinflusst, wenn Erkundungsbohrungen mit Schwerspat versiegelt sind.
- *Zersetzung von Organika*: Eventuell noch im Bohrloch vorhandene Kunststoffstandrohre können bei ihrer Zersetzung zur Entstehung von Wegsamkeiten beitragen.
- *Spannungsänderungen oder Spannungsumlagerungen*: Starke Spannungen im umgebenden Gebirge können zum Entstehen von Rissen in der Bohrlochverfüllung und damit zur Bildung von Wegsamkeiten führen. Diese können z. B. durch nicht thermisch induzierte Volumenänderungen (Quellen oder Schrumpfen von Baustoffen) beeinflusst werden.

Die in Tab. 7.7 zusammengefassten FEP werden direkt durch das FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* beeinflusst.

Tab. 7.7: Durch Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen beeinflusste FEP

Prozessgruppe	Beeinflusste FEP
Chemische / mikrobielle Prozesse	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude (Initial-FEP)
	Mikrobielle Prozesse im Wirtsgestein
	Mikrobielle Prozesse im Nebengebirge
Mechanische Prozesse	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (in allen Teilsystemen, Initial-FEP)
Thermische Prozesse	Wärmestrom
Hydraulische Prozesse	Strömungsvorgänge im Grubengebäude
	Strömungsvorgänge im Wirtsgestein
	Grundwasserströmung im Nebengebirge
	Gasströmung im Nebengebirge
	Fluiddruck (Initial-FEP)
	Mechanische Dispersion
	Diffusion

Für die Beschreibung der Ausprägung der Initial-FEP *Fluiddruck*, *Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude* und *Spannungsänderung und Spannungsumlagerung* ist eine direkte Beeinflussung durch das FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* zu unterstellen.

Fluiddruck: Der Fluiddruck im Teilsystem Strecken und Schächte wirkt auf die Initial-Barrieren Untere Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse. Daher sind hier nur untertägige Erkundungsbohrungen zu betrachten. Durch die Wegsamkeiten in den verfüllten Bohrungen können Fluide strömen dar und so den Fluiddruck beeinflussen. Da die Wegsamkeiten in den kleinen Erkundungsbohrungen nur ein geringes Volumen haben werden, ist eine signifikante Beeinflussung der Ausprägung des Fluiddrucks nicht zu erwarten.

Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude: Eine Zersetzung von organischen Bestandteilen von Verrohrungen bzw. ein nicht ordnungsgemäßer oder nur teilweiser Verschluss von Erkundungsbohrungen kann zu einer Bildung von Lebensraum für Mikroben führen. Im Vergleich zu den Resthohlräumen im Endlagerbergwerk sind die zusätzlichen Volumina in den verfüllten Bohrlöchern sehr gering.

Spannungsänderung und Spannungsumlagerung: Der Einfluss des FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* auf die Ausprägung des Initial-FEP Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen ergibt sich aus dem veränderten Porendruck, der über den Fluiddruck beschrieben ist. Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen beeinflussen nur lokal die Spannungsverhältnisse im Bohrloch (Strecken und Schächte) sowie im Wirtsgestein und Nebengebirge.

Weitere beeinflusste FEP

Im Folgenden werden die weiteren vom FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* beeinflussten FEP diskutiert (siehe Tab. 7.7).

Dabei handelt es sich insbesondere um die Transportprozesse, die durch die FEP *Strömungsvorgänge im Grubengebäude*, *Strömungsvorgängen im Wirtsgestein*, *Grundwas-*

serströmung im Nebengebirge sowie *Gasströmung im Nebengebirge* beschrieben werden. So können durch die Wegsamkeiten in den Bohrungen aufgrund von Strömungsvorgängen Lösungen mit anderen hydrochemischen Verhältnisse (z. B. aus dem Wirtsgestein) ins Grubengebäude transportiert werden. Ein wichtiger Antriebsmechanismus für die Strömungsvorgänge sind die Fluiddrucke in allen Teilsystemen. Veränderte hydrochemische Verhältnisse können eine Vielzahl weiterer Prozesse im Grubengebäude beeinflussen. Im Nebengebirge können übertägige Erkundungsbohrungen auf die Grundwasserverhältnisse im Nebengebirge geohydraulische Auswirkungen haben, indem sie Grundwasserstockwerke verbinden, die unter natürlichen Bedingungen voneinander isoliert, d. h. durch geringdurchlässige Schichten getrennt gewesen wären.

Mikrobielle Prozesse im Nebengebirge: Eine Zersetzung von organischen Bestandteilen von Verrohrungen bzw. eine nicht ordnungsgemäße oder nur teilweise Verfüllung von Erkundungsbohrungen kann zu einer Bildung des Lebensraums für Mikroben führen.

Mechanische Dispersion: Die Porenraumstruktur der Bohrlochverfüllung bestimmt den Stofftransport durch Dispersion.

Diffusion: Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen setzen eine erhöhte Porosität voraus, die den Stofftransport durch Diffusion beeinflusst. Dies ist bei der weniger wahrscheinlichen Ausprägung der Diffusion zu berücksichtigen.

7.4.2 Bewertung der Konsequenzen des FEP Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen

Unter den Voraussetzungen, dass alle übertägigen Bohrungen nicht in potentielle Einlagerungsbereiche reichen, bei der Auffahrung des Grubengebäudes ein ausreichender Sicherheitsabstand zu diesen berücksichtigt wurde und ehemalige Schachtvorbohrungen jetzt nicht mehr vorhanden sind, werden keine relevanten Auswirkungen von den zu unterstellenden Wegsamkeiten in diesen Erkundungsbohrungen erwartet. Daher ist kein Alternativszenarien zu betrachten.

Für Erkundungsbohrungen unter Tage sind drei Fälle zu betrachten:

1. Erkundungsbohrungen im Grubengebäude müssen einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu den zukünftigen Einlagerungsbereichen einhalten. Existierende Bohrungen werden bei der Endlagerplanung berücksichtigt, indem die Grubenbaue der Einlagerungssohle so aufgefahren werden, dass sie einen ausreichenden Abstand zu diesen aufweisen. In diesem Fall ist kein Alternativszenarium zu betrachten.
2. Erkundungsbohrungen im Grubengebäude, die bis in Gebirgsbereiche mit potenziell wasserführenden Schichten (z. B. Sandlinsen) reichen, können die hydraulische Integrität der Initial-Barriere Wirtsgestein beschädigen und dadurch zu einem Alternativszenarium führen. Da größere Sandlinsen nicht auszuschließen sind, ist ein Alternativszenarium zu betrachten. Treten innerhalb der verfüllten Bohrungen Resthohlräume auf, können diese bevorzugte Transportpfade darstellen, auch für eventuell durch Radionuklide belastete Fluide. So wäre in der Nachverschlussphase, in dem das Grubengebäude noch nicht wieder voll aufgesättigt ist, ein punktuell verstärkter Flüssigkeitszutritt zu berücksichtigen. Andererseits können Gase entlang dieses Ausbreitungspfades weiter als im Referenzszenarium ins Barrierengestein eindringen. Somit sind die Strömungsvorgänge in den Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen durch einen Zwei-Phasen-Fluss gekennzeichnet, so dass sich dadurch die Ausbreitungspfade verändern (was sowohl für die flüssige als auch für die Gasphase gilt). Potenzielle Wegsamkeiten in Bohrungen stellen im Vergleich zum Wirtsgestein und den Resthohlräumen im End-

lagerbergwerk jedoch nur ein sehr kleines zusätzliches Reservoir dar. Da das Wirtsgestein wassergesättigt ist und die Aufsättigung der Materialien im Grubenbau (Versatz, Abdichtbauwerke, Auflockerungszone) als wahrscheinlicher Prozess anzunehmen ist, werden nur in der frühen Nachverschlussphase Auswirkungen erwartet.

3. Ein mögliches Umfließen von Verschlussbauwerken im Grubengebäude durch Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen (hydraulischer Kurzschluss) hätte wegen des geringen potenziellen Strömungsquerschnittes nur eine geringe Bedeutung. Eine Wegsamkeit zwischen zwei, durch Abdichtbauwerke getrennte Grubenbereiche würde zu einem Umfließen des Dichtelementes führen und wird durch das Alternativszenarium Versagen von Streckenverschlüssen abgedeckt, so dass ein zusätzliches Alternativszenarium nicht zu betrachten ist.

8 Vergleich mit den Ergebnissen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben

Im Folgenden werden die methodischen Ansätze bei der Ableitung des FEP Kataloges für das Endlagerstandortmodell NORD mit den Ansätzen, die im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) entwickelt wurden, verglichen. Abgesehen von Wirtsgesteins- und Endlager-spezifischen Anpassungen wurden folgende Modifizierungen vorgenommen:

Im Rahmen von ANSICHT wurden die FEP eindeutig gegeneinander abgegrenzt und einem Zustand oder einem Ereignis / Prozess zugeordnet. Dadurch sollten inhaltliche Überschneidungen und Dopplungen in den FEP vermieden werden. Im Hinblick auf die FEP-Verknüpfungen wurden mit wenigen Ausnahmen (z. B. Verknüpfungen der Inventar-FEP mit anderen Zustands-FEP) keine direkten Zustand-Zustand-Abhängigkeiten ausgewiesen, sondern immer ein Prozess, der die Wechselwirkung vermittelt, dazwischen geschaltet. Prozess-Prozess-Verknüpfungen sind nicht grundsätzlich ausgeschlossen (z. B. wirken *Strömungsvorgänge im Wirtsgestein* auf *Strömungsvorgänge im Grubengebäude*). Da Initial-FEP per definitionem direkt auf Initialbarrieren (= Zustände) wirken, sollte es sich immer um Prozess-FEP handeln. Einen Sonderfall stellt das FEP *Fluiddruck* dar, das einerseits als Zustand klassifiziert wurde (Fluiddruck an einem Ort), andererseits aber auch Fluiddruck-Änderungen (Prozess) beschreibt und dann auf die Initialbarrieren einwirkt. Hier sollte in Zukunft eine klarere Definition erfolgen.

Bemerkung: Im weiteren Verlauf des Projektes sollte für den FEP-Katalog SÜD als weitere Optimierung angestrebt werden, die Aufteilung nach Prozessen und Zuständen konsequent ohne Ausnahmen umzusetzen und sowohl Zustand / Zustand, als auch Prozess / Prozess-Abhängigkeiten nicht zuzulassen.

Das Versagen von Barrieren wird in ANSICHT als spezielle Ausprägung des Barrieren-FEP verstanden und daher nicht mehr als eigene FEP im FEP-Katalog aufgenommen. Das Barrierenversagen fließt als Ausgangspunkt für die Ableitung von Alternativszenarien durch die alternative Ausprägung zu der spezifischen Annahme *"Die Schacht-, Strecken- und Bohrlochverschlüsse, der Buffer sowie Innenliner und Behälter werden anforderungsgerecht hergestellt..."* in die Szenarienentwicklung ein.

Im Folgenden soll durch einen Vergleich mit den Ergebnissen des Projektes VSG (Beuth et al. 2012) aufgezeigt werden, wie sich diese Änderungen des FEP-Katalogs auf die Szenarienentwicklung ausgewirkt haben.

8.1 Referenzszenario

Wahrscheinliche Ausprägung der Initial-FEP

Aufgrund der oben dargestellten Änderungen am FEP-Katalog hat sich die Anzahl der Initial-FEP im Projekt ANSICHT auf 12 reduziert (VSG: 23 Initial-FEP). Außerdem ergeben sich durch die neue Verknüpfungslogik längere Kausalketten. Daher ist zu untersuchen, ob trotz dieser Änderungen alle wesentlichen Aspekte in der Beschreibung des Referenzszenarios enthalten sind. In VSG sind neben den Prozess-FEP auch Zustands-FEP, die für die Funktion der Initialbarrieren relevant sind, Initial-FEP.

In Tab. 8.1 wird dargestellt, wie die VSG-Initial-FEP sinngemäß durch die ANSICHT-Initial-FEP abgebildet werden.

Tab. 8.1 Initial-FEP (I-FEP) im Projekt Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) (Beuth et al. 2012) und deren Umsetzung in der ersten Phase des Projektes ANSICHT. Salzspezifische FEP bzw. FEP, die aufgrund der geologischen oder endlagerspezifischen Rahmenbedingungen in ANSICHT nicht zu unterstellen sind, sind ausgegraut.

VSG-Initial-FEP	Umsetzung in ANSICHT
Erdbeben	Wirkt über das Initial FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
Diapirismus	Für Tonformationen nicht relevant
Subrosion	Für Tonformationen nicht relevant
Bildung kryogener Klüfte	In: Störungen und Klüfte in der Geosphäre, erreichen in der Modellregion ANSICHT-NORD nicht das Wirtsgestein, daher kein Initial-FEP
Glaziale Rinnenbildung	erreicht nicht das Wirtsgestein, daher kein Initial-FEP in ANSICHT
Versagen eines Brennelement-Behälters	Initialbarrieren mit unerkannten Defekten = Komponenten-Merkmal, Zustands-FEP der Barrieren als einwirkende FEP auf der 1. Ebene aller Initial-FEP
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Alteration von Verschlussbauwerken (Initial -FEP)
Konvergenz	Konvergenz (Initial -FEP)
Fluiddruck	Fluiddruck (Initial -FEP)
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (Initial -FEP)
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	Lageverschiebung des Schachtverschlusses (Initial -FEP)
Quellen des Bentonits	In: Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien (Initial -FEP)
Auflösung und Ausfällung	Initial -FEP: Alteration von Tonmineralen, Alteration von Sonstigen Mineralen, Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude
Metallkorrosion	Metallkorrosion (Initial -FEP)
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	Korrosion von Materialien mit Zementphasen (Initial -FEP)
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme (Initial -FEP)
Auflockerungszone	Fällt aufgrund des Screenings in der 1. Abhängigkeitsebene der Initial-FEP Fluiddruck und Spannungsänderung und Spannungsumlagerung raus, wird aber auf höheren Ebenen berücksichtigt
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	Keine relevanten Störungen und Klüfte im Wirtsgestein
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung (Initial -FEP) Thermische Expansion oder Kontraktion (Initial -FEP)
Fluidvorkommen im Wirtsgestein	Wirtsgestein wassergesättigt (kein InitialFEP)
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein nicht relevant (kein Initial-FEP)
Thermochemische Sulfatreduktion	Nicht relevant für das betrachtete Endlagerkonzept und das geologische Endlagerstandortmodell Nord
Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	Im Tonstein normal, beeinträchtigt nicht die Integrität des Wirtsgesteins, daher kein Initial-FEP

Entsprechend der Darstellung in Tab. 8.1 sind die VSG Initial-FEP (soweit sie für Tonstein relevant sind) bei der Entwicklung des Referenzszenarios für das Projekt ANSICHT direkt oder indirekt berücksichtigt. Die Unterschiede erklären sich z. T. durch wirtsgesteinsspezifische bzw. regionalgeologische Eigenschaften der Modellregionen. Weitere Ursachen für die Unterschiede sind die Zusammenfassung von FEP und die geänderte Methodik der FEP-Verknüpfungen in ANSICHT.

Da bei den Initial-FEP in der ersten Abhängigkeitsebene nur die Auswirkungen auf die Initialbarrieren betrachtet werden (Screening), tauchen die anderen Zustands-FEP (z. B. die Auf-

lockerungszone oder der Streckenausbau) erst auf der 3. oder höheren Ebene auf. Da bei der Ausprägungsdiskussion für ANSICHT NORD die 4. und 5. Ebenen nicht mehr betrachtet wurden, ist zur Ableitung der Entwicklung dieser Zustände auf den FEP-Katalog zurückzugreifen. Die textliche Darstellung im Szenarienbericht ist an dieser Stelle verkürzt.

Um Zustands-FEP, die erst in höheren Abhängigkeitsebenen (3 oder höher) auftauchen, aber nach Erfahrungen in anderen Sicherheitsanalysen für Endlager im Tonstein wichtig sind, im Referenzszenarium ANSICHT NORD aufzunehmen, wurde teilweise von der Beschränkung der Beschreibung auf die ersten zwei bis drei Abhängigkeitsebenen abgewichen und entsprechende Erläuterungen eingefügt (z. B. für das FEP *Streckenausbau*).

Betrachtet man die Verteilung der Initial-FEP in den Teilsystemen, so fällt auf, dass in VSG 16 Initial-FEP auf das Wirtsgestein einwirken, in ANSICHT nur 2 Initial-FEP. Die Diskrepanz zwischen beiden Projekten erklärt sich einerseits durch salzspezifische FEP und andererseits tauchen einige VSG-Initial-FEP im Projekt ANSICHT erst in den Abhängigkeiten der Initial-FEP auf. Weiterhin wurde eine Bewertung einiger VSG-Initial-FEP, z. B. *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*, *Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*, *thermochemische Sulfatreduktion*, durchgeführt, die ergeben hat, dass diese FEP für das Endlagerstandortmodell ANSICHT NORD nicht relevant sind.

Bemerkung:

Im weiteren Verlauf des Projektes sollte in der Vorbereitung der Szenarienanalyse für das Endlagerstandortmodell SÜD überlegt werden, ob die Fokussierung der Betrachtung auf Initial-FEP und Initial-Barrieren für Endlagersystementwicklungen im Tonstein zielführend ist. Im Salz macht diese Betrachtung Sinn, da das Wirtsgestein dicht ist und daher die Verschlussbauwerke (neben dem Wirtsgestein) die entscheidenden Barrieren sind. Die Rahmenbedingungen im Tonstein sind grundlegend anders und komplexer, da hier in allen Komponenten des Endlagersystems Transportprozesse stattfinden. Die für die Entwicklung des Endlagersystems relevanten und veränderlichen FEP *Streckenausbau* und *Versatz* sind zusätzliche Ansatzpunkte für die Szenarienentwicklung.

Wahrscheinliche Ausprägung der FEP Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport

Der zweite Ansatz für die Ableitung des Referenzszenarios sind die FEP *Radionuklidmobilisierung*, *Radionuklidtransport in der flüssigen Phase* sowie *Radionuklidtransport in der Gasphase*. Diese sind in beiden Projekten in ähnlicher Weise im FEP-Katalog und auch in der Szenarienentwicklung behandelt worden. So sind die einwirkenden FEP bei der Radionuklidmobilisierung weitgehend identisch. Die Transport-FEP (*Advektion*, *Dispersion*, *Diffusion*) wirken direkt auf den Radionuklid-Transport. Auf der 2. Ebene erscheinen dann die *Strömungsvorgänge*. Die Zustände, deren hydraulische Eigenschaften die *Strömungsvorgänge* beeinflussen, stehen in der 3. Ebene. Alle Einwirkungen auf diese Zustände finden sich in höheren Abhängigkeitsebenen und werden daher nicht in der Ausprägungsdiskussion und in der textlichen Beschreibung der Szenarien berücksichtigt. In der VSG wurde hier von der für die Ausprägungsdiskussion festgelegten Vorgehensweise abgewichen und die Ausprägung der strömungsrelevanten Zustände in die Szenarienbeschreibung einbezogen. Bei der Diskussion des Initial-FEP *Fluiddruck* wird ebenfalls auf die *Strömungsvorgänge* Bezug genommen, wobei allerdings aufgrund der Kausalketten die hierauf einwirkenden FEP nur kurz genannt werden.

Bemerkung:

Im weiteren Verlauf des Projektes sollte überlegt werden, ob in der Vorbereitung der Szenarienanalyse für das Endlagerstandortmodell SÜD ein Kriterium für die Vollständigkeit der Systembeschreibung entwickelt werden kann. Es soll geprüft werden, ob alle für die Systembeschreibung und Sicherheitsbewertung relevanten Zustände und Prozesse in hinreichender

Weise in den Szenarienbeschreibungen abgebildet sind. Maßstäbe hierfür könnten einerseits die Erfahrungen bei den Sicherheitsnachweisen für andere Tonstandorte und andererseits die Sicherheitsanforderungen (BMU, 2010) (Advektions-, Fluidruck-, Dilatanz- und Temperatur-Kriterien) sein, die in den Szenarienbeschreibungen in hinreichender Weise berücksichtigt werden sollten.

Spezifische Annahmen

Der Inhalt der spezifischen Annahmen ist sehr projektabhängig, da sie standort- und endlagerspezifische Annahmen als Ausgangspunkte für die Beschreibung des Referenzszenarios festlegen. So wurden im Projekt VSG Annahmen zur Klimaentwicklung, zur Errichtung der geotechnischen Barrieren, zur Verringerung des Sicherheitsabstandes um das Grubengebäude und zu den Wechselwirkungen zwischen Erkundungs- und Einlagerungssohle definiert. Abgesehen von der Annahme zur Klimaentwicklung, die, da es sich um dieselbe geografische und klimatische Region handelt, auch in ANSICHT übernommen wurde, sind alle anderen Annahmen Gorleben-spezifisch. Die Definition der spezifischen Annahme zur Errichtung der geotechnischen Barrieren wurde im Projekt ANSICHT – im Hinblick auf die Abdeckung der Versagen-FEP durch diese Annahme – dahingehend erweitert, dass Errichtungsfehler und Einwirkungen auf die Barrieren während der Nachverschlussphase eingeschlossen werden. Die anderen spezifischen Annahmen des Projektes ANSICHT sind tonsteinspezifisch (vgl. Kap. 6.1.2).

8.2 Alternativszenarien

In der ersten Phase des Projektes ANSICHT wurde die Anwendbarkeit der verschiedenen Ansätze zur Ableitung von Alternativszenarien nur exemplarisch untersucht. Insofern ist kein Vergleich des Spektrums der jeweils in den Projekten VSG und ANSICHT betrachteten weniger wahrscheinlichen Entwicklungsszenarien möglich. Im Folgenden soll deshalb nur kurz dargestellt werden, ob im Projekt ANSICHT prinzipiell mit der Methodik ähnliche Alternativszenarien wie im Projekt VSG abgeleitet werden.

1. Ansatzpunkt: Weniger wahrscheinliche Ausprägung von Initial-FEP

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung von Initial-FEP ist ein wesentlicher Ausgangspunkt für die Ableitung von Alternativszenarien. Sofern VSG-Initial-FEP durch die Abhängigkeiten in ANSICHT-Initial-FEP abgedeckt werden, gehen die weniger wahrscheinlichen Eigenschaften der Zustände (z. B. der *Auflockerungszone*) in die Beschreibung der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des Initial-FEP mit ein. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass FEP, die aufgrund einer vorgezogenen Bewertung für den Normalzustand des Wirtsgesteins als nicht relevant angesehen werden und im FEP als "nicht zu betrachten" eingruppiert werden, auch für die Diskussion weniger wahrscheinlicher Systementwicklungen nicht zur Verfügung stehen (z. B. *Thermochemische Sulfatreduktion, Störungen und Klüfte im Wirtsgestein, Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein*).

Bemerkung:

Es verbleibt zu prüfen, ob durch die modifizierte Methodik der Szenarienentwicklung im Projekt ANSICHT (geringere Anzahl Initial-FEP) die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems in ähnlichem Umfang abgedeckt wurden wie durch die VSG-Vorgehensweise. Diese Prüfung kann sich nur auf Expert Judgement und Plausibilitäten stützen, da ein absoluter Nachweis der Vollständigkeit nicht durchgeführt werden kann.

Im weiteren Verlauf des Projektes sollte überlegt werden, ob in der Vorbereitung der Szenarienanalyse für das Endlagerstandortmodell SÜD ein Kriterium entwickelt werden kann, um diese Abdeckung zu zeigen. In gleicher Weise sollte überlegt werden, ob das Verfahren zur

Festlegung bzw. zum Screening von Initial-FEP verbessert werden kann. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass FEP, die die Barrierenfunktion beeinträchtigen können, nur dann bei der weiteren Betrachtung nicht zu betrachten sind, wenn ihr Auftreten nicht nur in wahrscheinlicher sondern auch ihre weniger wahrscheinliche Ausprägung sicher ausgeschlossen werden kann.

2. Ansatzpunkt: Weniger wahrscheinliche Ausprägung der FEP Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der FEP *Radionuklidmobilisierung und –transport* wird in beiden Projekten in ähnlicher Weise behandelt. Wie bei der Beschreibung des Referenzszenarios treten die *Strömungsprozesse* und die sie beeinflussenden Zustände und Prozesse erst auf höheren Abhängigkeitsebenen auf. Zur Beschreibung der Ausprägung der Strömungsprozesse wurde daher z. T. auf den FEP-Katalog (höhere Abhängigkeitsebenen) zurückgegriffen. In der Ausprägungsdiskussion wurde unterstellt, dass die weniger wahrscheinliche Ausprägung der FEP zum Radionuklidtransport durch die einwirkenden FEP für das FEP Radionuklidmobilisierung abgedeckt wird.

Die weniger wahrscheinliche Ausprägung der *Strömungsvorgänge* wird zudem bei der Ableitung von Alternativszenarien durch die weniger wahrscheinliche Ausprägung des Initial-FEP *Fluiddruck* berücksichtigt.

3. Ansatzpunkt: Alternativen zu spezifischen Annahmen

Da, wie bereits eingangs erwähnt, die spezifischen Annahmen sehr gesteins- und endlager-spezifisch sind, ist ein direkter Vergleich der hieraus abgeleiteten Alternativszenarien nicht möglich.

Eine Abweichung von der VSG-Methodik ist, dass das Versagen von technischen Barrieren im Projekt ANSICHT nicht durch weniger wahrscheinliche Versagens-FEP sondern durch Alternativen zu spezifischen Annahmen bei der Ableitung von Alternativszenarien berücksichtigt wird. Durch diese Vorgehensweise wird eine Ableitung ähnlicher Alternativszenarien vermieden, wie sie sich im Projekt VSG durch die Alternative zur spezifischen Annahme "Anforderungsgerechte Errichtung von Strecken- und Schachtverschlüsse" und durch die weniger wahrscheinlichen Versagens-FEP ergeben haben. Durch den Bezug der spezifischen Annahmen zu den Zustands-FEP bleibt auch bei der ANSICHT-Vorgehensweise die Verknüpfung mit dem FEP-Katalog erhalten.

4. Ansatzpunkt: Weniger wahrscheinliche FEP

Von den 4 weniger wahrscheinlichen FEP im Projekt VSG wurden nach Wegfall der zwei Versagens-FEP die FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* und *Kanalisation in Dichtelementen* im Projekt ANSICHT beibehalten und das zusätzliche FEP *Gas-Fracs im Wirtsgestein* aufgenommen. Die Ableitung der Alternativszenarien für die FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* und *Kanalisation in Dichtelementen* entspricht – von gesteins-spezifischen Abweichungen abgesehen – der VSG Methodik.

9 Zusammenfassung

Zielsetzung

In einer Szenarienentwicklung sind die möglichen Entwicklungen, die ein Endlagersystem über den zugrunde liegenden Nachweiszeitraum nehmen kann und die für den Langzeitsicherheitsnachweis relevant sind, in einem systematischen Prozess möglichst umfassend abzuleiten und zu beschreiben.

Der methodische Ansatz für die Szenarienentwicklung in der VSG wurde aus dem salzspezifischen Sicherheitskonzept abgeleitet. Dieses basiert auf dem (dichten) Wirtsgestein Salz und den Verschlussbauwerken, die die Strecken und Schächte abdichten (Konzept des "trockenen" Einschlusses als Referenzentwicklung). Die Rahmenbedingungen (und auch das Sicherheitskonzept) sind in Tongesteinen grundsätzlich anders. Im Endlagersystem in Tonstein stehen zu jeder Zeit und an jedem Ort Fluide zur Verfügung. Grundsätzlich können in jedem Bereich Transportprozesse stattfinden.

Ziel des Projektes ANSICHT war es, die Anwendbarkeit der im Zuge der F&E Projekte ISIBEL und VSG für die Szenarienentwicklung in Salzformationen entwickelte Methodik auf Endlager in Tonformationen zu prüfen und weiter zu entwickeln. Grundlagen dafür sind zwei generische Tonstandorte in Nord- bzw. Süddeutschland und zwei hierfür entwickelte Endlagerkonzepte, wobei in dem vorliegenden Bericht die Ergebnisse für das Endlagerstandortmodell Nord beschrieben werden.

Vorgehensweise

Wesentliche Grundlage für die methodische Vorgehensweise bei der Szenarienentwicklung bildet ein standortspezifischer FEP-Katalog, der möglichst umfassend alle Prozesse und Zustände in und um ein Endlager erfasst und beschreibt.

Daher wurde zunächst eine inhaltliche Anpassung des VSG-FEP-Katalogs an das Wirtsgestein Tonstein und dessen Eigenschaften sowie an das abweichende Endlagerkonzept durchgeführt. Zur Optimierung von Struktur und Inhalt des FEP-Katalogs wurden außerdem die methodischen Ansätze zur Charakterisierung, Abgrenzung und Beschreibung der Abhängigkeiten der FEP modifiziert. So wurde damit begonnen, die FEP-Definitionen so zu konkretisieren, dass sie eindeutig gegeneinander abzugrenzen sind und darüber hinaus nach Möglichkeit entweder einem Zustand oder einem Ereignis/Prozess zuzuordnen sind. Im Hinblick auf die Logik der FEP-Verknüpfungen wurden bis auf wenige Ausnahmen direkte Verknüpfungen zweier Zustands-FEP vermieden. Die Verknüpfung erfolgt für die Zustände daher im Allgemeinen über Prozess-FEP. Prozess-Prozess-Verknüpfungen sind nicht ausgeschlossen. Entsprechend dieser Logik sollten Initial-FEP immer Prozess-FEP sein. Da die Versagens-FEP der technischen Komponenten nur spezielle Ausprägungen der Zustands-FEP sind, sind sie im FEP-Katalog weggefallen. Diese Festlegung hat auch Auswirkungen auf die Ableitung der entsprechenden Alternativszenarien, so dass diese jetzt über einen anderen methodischen Ansatz erfolgen.

Ein zusätzlicher Ausgangspunkt zur Gliederung des Prozesses der Szenarienentwicklung und zur Abgrenzung des Referenzszenariums von den Alternativszenarien ist die Definition spezifischer Annahmen. Durch diese Annahmen werden Festlegungen zu Sachverhalten (z. B. der Klimaentwicklung) getroffen, bei denen hohe Ungewissheiten bestehen, die auch in Zukunft nicht ausgeräumt werden können. Deshalb ist eine derartige Annahme z. B. die Definition eines zukünftigen Klimabildes. Weiterhin werden wirtsgesteins- oder endlagerspezifische Randbedingungen festgelegt. Ein Beispiel hierfür betrifft die Errichtung und Auslegung der Verschlussbauwerke, für die unterstellt wird, dass sie im Referenzfall in der vorgesehenen Weise funktionieren werden (Abgrenzung zu Alternativszenarien).

Initial-FEP beschreiben die Prozesse, die sich auf die Funktion der Barrieren auswirken können. Diese FEP stellen – in wahrscheinlicher Ausprägung – einen weiteren Ansatzpunkt für die Beschreibung des Referenzszenarios dar. Durch die Änderung einiger FEP-Definitionen, die Entfernung salzspezifischer FEP und solcher, die im Tongestein als nicht relevant angesehen wurden, reduziert sich die Anzahl der Initial-FEP im Vergleich zu VSG auf die Hälfte. Die Ausprägung dieser FEP leitet sich aus den im FEP-Katalog dargestellten einwirkenden FEP ab, wobei mehrere Abhängigkeitsebenen zu betrachten sind. Aus Gründen der Handhabbarkeit und Effektivität wurde hier die Diskussion der Abhängigkeiten auf 3 Abhängigkeitsebenen beschränkt, wobei im entsprechenden Bericht nur die Einwirkungen der ersten 2 Ebenen beschrieben wurden. Relevante Prozesse der 3. (oder höheren) Ebenen wurden nur benannt und bezüglich weiterer Informationen auf den FEP-Katalog verwiesen. Durch die oben dargestellte neue Verknüpfungslogik haben sich teilweise die Kausalketten verlängert, so dass – nach Erfahrungen in anderen Sicherheitsanalysen - relevante Zustände oder Prozesse erst in höheren Abhängigkeitsebenen (3 oder höher) auftauchen. In diesem Fall muss für eine detaillierte Ableitung der Ausprägung der Initial-FEP auf den FEP-Katalog zurückgegriffen werden.

Im weiteren Verlauf des Projektes soll überlegt werden, ob in der Vorbereitung der Szenarienanalyse für das Endlagerstandortmodell SÜD ein Kriterium entwickelt werden kann, um zu zeigen, ob alle für die Systembeschreibung und Sicherheitsbewertung relevanten Zustände und Prozesse in hinreichender Weise in den Szenarienbeschreibungen abgebildet sind, insbesondere solche, die in direktem Zusammenhang mit den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) stehen.

Weiterhin soll überlegt werden, ob der Ansatzpunkt der Initial-FEP und Initial-Barrieren in der bisherigen Form der Festlegung (inkl. Screening) den abweichenden Rahmenbedingungen im Tongestein gerecht wird.

Neben der Funktion der Barrieren sind die Mobilisierung und der Transport der Radionuklide weitere wichtige Aspekte der Systementwicklung. Daher bilden die entsprechenden FEP den dritten Ansatzpunkt für die Beschreibung des Referenzszenarios. Ihre Ausprägung wird ebenfalls aus einwirkenden FEP abgeleitet. Entsprechend den Kausalketten tauchen hier wichtige Zustände, die die Transport- und Strömungsprozesse beeinflussen (z. B. Versatz incl. Firstspalte, Auflockerungszone, Streckenausbau), in der 3. oder noch höheren Abhängigkeitsebenen auf. Die Beschreibung der Entwicklung dieser Zustände findet sich daher nicht im Ausprägungsbericht, sondern muss aus dem FEP-Katalog abgeleitet werden.

Alternativszenarien wurden – in Analogie zu VSG – mit den folgenden verschiedenen Ansätzen abgeleitet:

- aus Alternativen zu den spezifischen Annahmen (z. B. andere Klimabilder oder das Versagen von Verschlussbauwerken)
- die weniger wahrscheinliche Ausprägung von Initial-FEP (z. B. wesentlich stärkere Alterations- oder Korrosionsprozesse)
- die weniger wahrscheinliche Ausprägung der FEP RN-Mobilisierung und RN-Transport
- sowie weniger wahrscheinliche FEP (z. B. *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen*)

Die Ableitung von Alternativszenarien wurde für das Projekt ANSICHT (Endlagerstandortmodell NORD) exemplarisch durchgeführt (ein Beispiel je methodischer Ansatz).

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeiten während der ersten Phase des Projektes ANSICHT belegen, dass die für Salzgesteine entwickelte VSG-Methodik für die Szenarienentwicklung prinzipiell auch auf Tongesteine anwendbar ist. Es konnte ein Referenzszenarium für das Endlagerstandortmodell NORD abgeleitet werden, das alle im FEP-Katalog enthaltenen wahrscheinlichen Prozesse und Zustände berücksichtigt.

Die im Vergleich zu VSG deutlich geringere Anzahl an Initial-FEP führt diesbezüglich zu keinen Defiziten, allerdings resultiert aus den längeren Kausalketten, dass – nach Erfahrungen in anderen Sicherheitsnachweisen – relevante FEP erst in höheren Abhängigkeitsebenen auftauchen. Um diese FEP in den Szenarienbeschreibungen angemessen zu berücksichtigen, wurden die entsprechenden Informationen dem FEP-Katalog entnommen.

Die geringere Anzahl der Initial-FEP im Projekt ANSICHT führt auch zu einer entsprechend geringeren Anzahl entsprechender Alternativszenarien. Ob trotzdem alle weniger wahrscheinlichen Systementwicklungen abgedeckt werden, kann erst nach einer kompletten Ableitung aller Alternativszenarien geklärt werden. Ein Teil der Zustands-FEP, die in VSG als Initial-FEP betrachtet wurden, wurde aus der Szenarienentwicklung im Projekt ANSICHT ausgeschlossen ("nicht zu betrachten"), da sie für die Normalentwicklung nicht relevant sind (z. B. *Störungen und Klüfte im Wirtsgestein*). Damit bilden diese FEP aber auch keine Ausgangspunkte mehr für die Ableitung von Alternativszenarien. Wichtig ist es, in Zukunft beim Screening der FEP zu prüfen, ob diese FEP auch für weniger wahrscheinliche Ausprägungen völlig auszuschließen sind.

Der neue Ansatz, die Versagens-FEP über Alternativen zu spezifischen Annahmen in die Ableitung von Alternativszenarien aufzunehmen, ist gleichwertig mit dem VSG-Ansatz dieses über weniger wahrscheinliche FEP zu tun. Weiterhin verhindert diese Vorgehensweise eine Betrachtung ähnlicher Entwicklungen aufgrund zweier Ansätze zur Ableitung von Alternativszenarien.

Entsprechend den Ergebnissen in der ersten Phase des Projektes ANSICHT sind für die zweite Phase des Projektes – die Bearbeitung des Endlagerstandortmodells Süd – Optimierungen für den FEP-Katalog und die Szenarienentwicklung vorgesehen.

10 Literaturverzeichnis

- ANDRA (2005). Dossier 2005 Argile Tome: Architecture and management of a geological repository. Tech. rep., Andra.
- Aseev, A.A. (1968). Dynamik und geomorphologische Wirkung der europäischen Eisschilde.– Petermanns geogr. Mitt., 112: 112-115, Gotha.
- Aseev, A.A. (1974). Drevnie materikovyie olodnenenija Evropy. [Alte Festlandsvereisungen Europas].– Inst. Geografii: 318, Moskva (Akad. UdSSR).
- Aseev, A.A. (1978). Aufbau und großregionale Wirkung von Inlandvereisungen. (Die Grundlagen einer allgemeinen Theorie der glazialen Litho- und Morphogenese).– Schriftenreihe geol. Wiss., H. 9: 61-67; Berlin.
- Bernhard, H. (1963). Der Drucksetzungsversuch als Hilfsmittel zur Ermittlung der Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises in Nordwestniedersachsen.– T. H. Hannover, Mitt. Geol. Inst. Univ. Hannover: 168, Hannover.
- Beuth, Th., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A. & Wolf, J. (2012): Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8: Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.- GRS-284, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln
- BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stand: 30. September 2010.
- Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Filbert, W., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Weber, J.R., & Wolf, J. (2013). Status of the safety concept and safety demonstration concept for an HLW repository in salt.- Summary Report, FKZ: 02E10719, 02E10729, DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-15-2013-AB, Peine.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R. & Tholen, M. (2012). Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- Boulton, G.S., Smith, G.D., Jones, A.S. & Newsome, J. (1985). Glacial geology and glaciology of the last mid-latitude ice sheets.– J. geol. Soc. London: 447-474, London.
- Feldmann, L. (2002). Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär.– Clausthaler Geowissenschaften, 1, X; Clausthal-Zellerfeld.
- Forsström, L. (1999). Future glaciation in Fennoscandia.– Posiva OY, 99-30, POSIVA: 31; Helsinki.
- Forsström, P.-L., Sallasmaa, O., Greve, R. & Zwinger, T. (2003). Simulation of fast-flow features of the Fennoscandian ice sheet during the Last Glacial Maximum.– International Glaciological Society, Annals of Glaciology: 383-389.
- Grimmelmann, W., Hannemann, M., Hecht, G., Müller, A., Plum, H., Pretschold, H.-H., Scharff, H.J. & Schlimm, W. (1997). Hydrogeologische Kartieranleitung. Ad-Hoc-Arbeitsgruppe, Hydrogeologie.- Geol. Jb. G2, 3-157, Hannover.
- Herold, P., Gruner, M., Jobmann, M. & Kudla, W. (2016). ELSA Phase II, Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein, Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH, TU Bergakademie Freiberg, Peine, Freiberg.
- Heunisch, C., Caspers, G., Elbracht, J., Langer, A., Röhling, H.-G., Schwarz, C. & Streif, H. (2007). Erdgeschichte von Niedersachsen. Geologie und Landschaftsentwicklung.– Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), GeoBerichte 6: 3-85, 57 Abb., 18 Tab., Hannover.
- Jahn, S., & Sönnke, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Jobmann, M., Meleshyn, A., Maßmann, J. & Polster, M. (2015). Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Kaltwang, J. (1992). Die pleistozäne Vereisungsgrenze im südlichen Niedersachsen und im östlichen Westfalen.– Mitt. Geol. Inst. Univ. Hannover, 33: 161, Hannover.
- KTa 2201.1: Sicherheitstechnische Regel des KTA / Kerntechnischer Ausschuss: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 1: Grundsätze; Fassung 2011-11 – In: Bundesministerium der Justiz (Hrsg.); Bekanntmachung von sicherheitstechnischen Regeln

- des Kerntechnischen Ausschusses (Regeln KTA 1505, KTA 2201.1 und KTA 2502) vom 5. Dezember 2011; Bundesanzeiger-Verl.-Ges.: 51 S., Köln.
- Lambeck, K., Purcell, A., Funder, S., Kjær, K.H., Larsen, E. & Möller, P. (2006). Constraints on the Late Saalian to early Middle Weichselian ice sheet of Eurasia from field data and rebound modelling.–, *Boreas*: 539-575, Oxford.
- Lambeck, K., Purcell, A., Zhao, J. & Svensson, N.-O. (2010). The Scandinavian Ice Sheet: from MIS 4 to the end of the Last Glacial Maximum.–, *Boreas*: 410–435, Oxford.
- Litt, T., Behre, K.-E., Meyer, K.-D., Stephan, H.-J. & Wansa, S. (2007). Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes.– *Eiszeitalter u. Gegenwart*, Vol. 56, No 1/2: 7-65, DOI: 10.3285/eg.56.1-2.02; Stuttgart (Schweizerbart'sche).
- Lommerzheim, A. & Jobmann, M. (2015): Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. & Stocker, T.F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present.– *Nature*, 453: 379-382, 3 fig., DOI: 10.1038/nature06949, (Nature Publishing Group).
- Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B. & Fischer-Appelt, K. (2012). Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum AP 4. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-277, ISBN 978-3-939355-53-3.
- Mrugalla, S. (2014). Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Norddeutschland – ohne Endlagereinfluss, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Nagra (2002). Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Technical Report, Nagra, Wettingen (Schweiz).
- Nowak, T. & Maßmann, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Modellberechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises, Techn. Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- ONDRAF/NIRAS (2001). Technical overview of the SAFIR 2 report, Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. Tech. rep., ONDRAF/NIRAS.
- Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H., Filbert, W., & Tholen, M. (2010). Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein - ERATO -. Tech. Rep., DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Reinhold, K., Jahn, S., Kühnlenz, T., Ptock, L., & Sönke, J. (2013). Endlagerstandortmodell Nord - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Reinhold, K. & Sönke, J. (2012). Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle im Tongestein, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, Hannover.
- Rübel, A., & Meleshyn, A. (2014). Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie, Technischer Bericht GRS-338, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, GRS, Braunschweig.
- Siegert, M.J. & Dowdeswell, J.A. (2004). Numerical reconstructions of the Eurasian Ice Sheet and climate during the Late Weichselian.– *Quaternary Science Reviews*, 23: 1273–1283, DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.010., Amsterdam.
- Svensk Karnbranslehantering AB (SKB) (2010). Climate and climate related issues for the safety assessment SR-Site.–, SKB TR-10-49: 328, Stockholm.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Keller, S. & Gerardi, J. (2015). FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau, Technischer Bericht, F&E-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Wickham, S. (2008). Evolution of the near-field of the ONDRAF/NIRAS repository concept for Category C wastes (first full draft report). Tech. rep., Galson Sciences Ltd.