

**VerSi  
Darstellung der  
Arbeiten zur Ableitung  
von Szenarien**

Abschlussbericht zum Vorhaben  
3607R02580  
„Szenarienentwicklung“

VerSi  
Darstellung der Arbeiten zur Ableitung von Szenarien

Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02580 „Szenari-entwicklung“

VerSi  
Darstellung der Arbeiten zur  
Ableitung von Szenarien

Abschlussbericht zum Vorhaben  
3607R02580  
„Szenariientwicklung“

T. Beuth  
G. Bracke

März 2010

Auftrags-Nr.: 854710

**Anmerkung:**

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3607R02580 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

## **Kurzfassung**

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Darstellung der Arbeiten zum Vorhaben 3607R02580 in Bezug auf die Bereitstellung einer Methodik zur Ableitung von Szenarien für einen Endlagerstandort in Salz und Ton und baut auf den Entwicklungen und Ergebnissen der Zwischenberichte vom April 2008 und Dezember 2008 auf.

Der Bericht umfasst die nach der entwickelten methodischen Vorgehensweise durchgeführten Arbeiten zu den erforderlichen Datengrundlagen, den getroffenen Festlegungen, der Beschreibung der erwarteten Entwicklung für die beiden Endlagerstandorte, der Durchführung einer Funktionsanalyse und die fachliche Interpretation sowie Diskussion als Grundlage für die abschließende exemplarische Ableitung von Szenarien. Weiterhin werden die im Zusammenhang mit den Arbeitsergebnissen, Festlegungen und Rahmenbedingungen verbundenen subjektiven Einflüsse identifiziert und diskutiert.

## **Abstract**

This report contains a presentation of the work in connection with Project 3607R02580 relating to the provision of a method for deriving scenarios for a repository site in salt and clay and builds on the developments and results of the interim reports of April 2008 and December 2008.

The report covers the work carried out according to the specially developed methodical approach with respect to the necessary data bases, the stipulations made, the description of the expected evolutions of the two repository sites, the performance of a functional analysis as well as the technical interpretation and discussion as a basis for the final exemplary derivation of scenarios. Furthermore, the subjective influences associated with the working results, specifications and boundary conditions are identified and discussed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Methodischer Ansatz</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Darstellung der Elemente und der durchgeführten Arbeiten</b> .....	<b>3</b>
3.1	Systemkomponenten .....	3
3.1.1	Einteilung/ Struktur der Systemkomponenten .....	4
3.1.2	Grundlage und Beschreibung .....	7
3.1.3	Konzeptspezifische Unterteilung .....	8
3.2	Relevante Faktoren .....	11
3.2.1	Einteilung/ Struktur der FEP-Datenbasis.....	11
3.2.2	Datengrundlage der FEP .....	13
3.2.3	Relevanz und Ausschluss von FEP .....	16
3.2.4	Zuordnung der relevanten Faktoren zu den Systemkomponenten .....	22
3.3	Sicherheitsfunktionen .....	24
3.3.1	Einteilung/ Struktur der Sicherheitsfunktionen.....	26
3.3.2	Datengrundlage an Sicherheitsfunktionen .....	29
3.3.3	Festlegung von relevanten Sicherheitsfunktionen .....	31
<b>4</b>	<b>Erwartete Entwicklung für die Endlagersysteme</b> .....	<b>34</b>
4.1	Steinsalzstandort .....	35
4.2	Tonsteinstandort.....	41
<b>5</b>	<b>Funktionsanalyse</b> .....	<b>47</b>
5.1	Einfluss nehmende Faktoren auf festgelegte Sicherheitsfunktionen.....	49
5.2	Untersuchung einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung von Sicherheitsfunktionen .....	54
5.3	Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von Sicherheitsfunktionen .....	68
<b>6</b>	<b>Szenarien</b> .....	<b>76</b>
6.1	Rahmenbedingungen und Festlegungen .....	77
6.2	Ableitung von Szenarien .....	79

6.3	Festgelegte Szenarien und Abgleich.....	104
7	<b>Potenzielle - und unvermeidbare subjektive Einflüsse .....</b>	<b>107</b>
8	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>115</b>
9	<b>Literatur .....</b>	<b>118</b>
10	<b>Anhang .....</b>	<b>124</b>

## **Abkürzungsverzeichnis**

A	Radioaktiver Abfall
AB	Abfallbehälter
AG	Abfallgebinde
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandort
ANDRA	Agence Nationale por la gestion des Dechets Radioactifs
AP	Abfallprodukt
BE	Geotechnische Barriere
BENIPA	Bentonite Barriers in Integrated Performance Assessment
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BG	Beurteilungsgröße
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BM	Bewertungsmaßstab
Colenco	Colenco Power Engineering Ltd.
EDZ	Excavation Damaged Zone
EL	Endlager
ELB	Einlagerungsbereich
EB	Endlagerbergwerk
ES	Endlagersystem

EU	European Union
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
F&E	Forschung und Entwicklung
FEP	Features, Events and Processes
FEP-CAT	Features, Events and Processes Catalog
FM	Fixierungsmittel
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
GS	Gesamtsystem inklusive Biosphäre
GSF	Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung
GU	Geologische Umgebung
IAEA	International Atomic Energy Agency
ISIBEL	Überprüfung und Bewertung des bereits verfügbaren Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HLW
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NEA	Nuclear Energy Agency
PAMINA	Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case
POSIVA	Posiva Oy
R	Radionuklidrückhaltung

S	Schutz rückhaltender Sicherheitsfunktionen
SCK•CEN	Studiecentrum voor Kernenergie - Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire
SF	Sicherheitsfunktion
SK	Systemkomponente
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SV	Schachtverschluss
VE	Versatz
VerSi	Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien
WB	Weitere Barrieren Restgrube
WG	Wirtsgestein
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant

## **Tabellenverzeichnis**

- Tab. 3.1: Auflistung möglicher weiterer Untergruppen zu den Systemkomponenten
- Tab. 3.2: Überblick über die verwendeten FEP-Datengrundlagen zur Erstellung der FEP-Datenbasis für das Teilvorhaben 3607R02580
- Tab. 3.3: Statistische Angaben zur generierten FEP-Datengrundlage
- Tab. 3.4: Ausschlusskriterium und Anzahl der ausgeschlossenen FEP
- Tab. 5.1: Gruppierung der zugeordneten FEP zu der SF Begrenzung/ Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG (WG, Salzstandort)
- Tab. 6.1: Stand zur Festlegung von Szenarien für den Salzstandort und Tonstandort als Grundlage für die Langzeitsicherheitsanalysen

## **Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Systemkomponenten in einem Endlager-system und seiner Umgebung
- Abb. 3.2: Übersicht von charakteristischen abfallspezifischen Planungsmerkmalen im Zusammenhang mit dem Verbundvorhaben VerSi (aus /PEI 08/ entnommen)
- Abb. 3.3: Darstellung der Einteilungsstruktur von FEP in Haupt- und Untergruppen
- Abb. 3.4: Darstellung der Einteilungsstruktur von Sicherheitsfunktionen nach primären Sicherheitsfunktionen und deren Untergruppen
- Abb. 3.5: Auflistung der gruppierten Sicherheitsfunktionen mit Angabe der Identifikationsnummer (SF\_ZUS\_NR), der Benennung der SF (Beschreibung der SF) und der Art der SF (Schutz (S)/ Rückhaltung (R)) und die Systemkomponenten (A, FM, ...; WG, GU) mit Angabe der Teilsysteme (AP, AG, etc), die die SF wahrnehmen (mit x gekennzeichnet).
- Abb. 5.1: Ausschnitt aus der Datengrundlage (Anhang 3) in Bezug auf zugeordnete FEP zum Wirtsgestein (WG)

- Abb. 5.2: Ausschnitt der Matrix mit der Gegenüberstellung von FEP aus der Vorselektion zum WG und den festgelegten SF
- Abb. 5.3: Ausschnitt der Matrix (analog Abb. 5.2) und dem Eintrag (gekennzeichnet mit x) hinsichtlich Einfluss nehmender FEP auf die SF
- Abb. 5.4: Schematische Darstellung von möglichen Lösungszutritten aus dem WG in den ewG
- Abb. 5.5: Schematische Darstellung von möglichen Lösungszutritten aus dem WG in den ewG unter Einbeziehung von möglichen Quellen an Lösungen/ Wässern und Transportprozessen
- Abb. 5.6: Schematische Darstellung von möglichen Abläufen und Mechanismen zur Untersuchung einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/ Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“
- Abb. 5.7: Darstellung möglicher Beziehungen von weiteren Sicherheitsfunktionen (SF) „rote Markierung“ zu der SF 9 und der Systemkomponente Wirtsgestein (WG) „gelbe Markierung“
- Abb. 5.8: Schematische Darstellung verschiedener Systemkomponenten und ihre Sicherheitsfunktionen sowie deren Verbindung und Einflussnahme untereinander
- Abb. 5.9: Darstellung der möglichen Einflussnahme von Systemkomponenten (SK) und Sicherheitsfunktionen (SF) auf andere in Verbindung stehende SK und SF
- Abb. 5.10: Darstellung der Wirkungszeiträume „blaue Markierung“ entlang der eingeteilten Zeitphasen zu den in Beziehung stehenden SF
- Abb. 6.1: Mögliche Quellen an Lösungen/ Wässern in Bezug auf das Endlagersystem in Salz und deren Einteilung in Kategorien
- Abb. 6.2: Vertikalschnitt (NW – SE) des Salzstocks Gorleben /BGR 07/
- Abb. 6.3: Vertikalschnitt (NW – SE) des Salzstocks Gorleben bis -1000 m und der Darstellung der Erkundungssohle sowie des Schachtes /BOR 08/

## **Verzeichnis der Anhänge**

- Anhang 1: FEP-Datengrundlage
- Anhang 2: Ausweisung von möglicherweise relevanten - und auszuschließende FEP in der FEP-Datengrundlage
- Anhang 3: Zuordnungsmatrix FEP zu Systemkomponenten
- Anhang 4: SF-Datengrundlage
- Anhang 5: Festgelegte Sicherheitsfunktionen
- Anhang 6: Erwartete Entwicklung für den Endlagerstandort in Salz
- Anhang 7: Erwartete Entwicklung für den Endlagerstandort in Ton
- Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponenten

## **1 Einleitung**

Das Forschungsvorhaben 3607R02580 befasst sich mit der Möglichkeit einer systematischen Entwicklung von Szenarien für einen Salz- und einen Tonstandort. Die Szenarien beschreiben mögliche zukünftige Ausprägungen des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen, die die Grundlage für Langzeitsicherheitsanalysen bilden.

Das Ziel des Vorhabens umfasst daher die Ausarbeitung einer Methodik, die die systematische Ableitung von Szenarien für beide Standorte und eine umfassende Szenarientwicklung im Rahmen einer späteren Anwendung ermöglichen soll.

Mit der Szenarientwicklung ist neben dem methodischen Ansatz, die illustrative Anwendung zur Ableitung von Szenarien sowie die Einbeziehung und Verfolgung der übergeordneten Zielsetzung des Verbundvorhabens VerSi verbunden. Die übergeordnete Zielsetzung beinhaltet die Entwicklung eines Verfahrens, das einen Standortvergleich von Endlagern in unterschiedlichen geologischen Formationen erlaubt. Das heißt, dass die Szenarientwicklung einerseits standortspezifische und konzeptspezifische Merkmale berücksichtigen und andererseits einen Vergleich von Ergebnissen z. B. aus Langzeitsicherheitsanalysen anhand eines zu entwickelnden Bewertungsschemas im Blick haben muss.

Der vorliegende Bericht baut auf den Entwicklungen und Ergebnissen des 1. Zwischenberichtes vom April 2008 /GRS 08a/ und des 2. Zwischenberichtes vom Dezember 2008 /GRS 08b/ auf und stellt somit eine konsequente Fortführung der Arbeiten zur Szenarientwicklung dar.

## **2 Methodischer Ansatz**

In diesem Kapitel werden die verfolgten Absichten und die wesentlichen Schritte bzw. Grundzüge der methodischen Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien ausgeführt. Die Ergebnisse der Arbeiten zu den einzelnen Schritten werden in den Folgekapiteln dargestellt.

Die Erarbeitung einer methodischen Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien ist ein wesentliches Element im Rahmen des Forschungsvorhabens 3607R02580. Mit der methodischen Vorgehensweise sollte vor allem ein systematischer Ablauf verbunden sein, der gleichermaßen für den Ton- und den Salzstandort entlang definierter Schritte anwendbar ist. Darüber hinaus ist mit einer systematischen Vorgehensweise die Vorstellung verbunden, mögliche vergleichsadäquate Größen einzugrenzen bzw. auszumachen, um somit erste Ansatzpunkte für das Forschungsvorhaben 3607R02589 "Evaluierung" zu liefern.

Schritt 1)

Aufstellung bzw. Identifizierung der sog. Systemkomponenten (SK), die in ihrer Gesamtheit die Umwelt, den Standort und alle weiteren wesentlichen zu einem Endlager gehörenden Elemente umfassen (siehe hierzu Kapitel 3.1).

Schritt 2)

Erstellung einer FEP-Datenbasis, mit den wesentlichen Einfluss nehmenden bzw. bestimmenden Größen auf die zugrunde liegenden Endlagersysteme (siehe hierzu Kapitel 3.2).

Schritt 3)

Zuordnung der aus Schritt 2) ermittelten FEP zu den Systemkomponenten aus Schritt 1) (siehe hierzu Kapitel 3.2.4).

Schritt 4)

Ermittlung und Beschreibung von Sicherheitsfunktionen (SF) entlang der aufgestellten SK (siehe hierzu Kapitel 3.3)

Schritt 5)

Beschreibung der erwarteten Entwicklung der Endlagerstandorte und Endlagersysteme entlang der aus Schritt 1) aufgestellten und identifizierten Systemkomponenten.

Schritt 6)

Durchführung einer Funktionsanalyse mit der Untersuchung von Einfluss nehmenden Faktoren auf festgelegte Sicherheitsfunktionen, einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung von Sicherheitsfunktionen und der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von Sicherheitsfunktionen.

Schritt 7)

Ableitung von Szenarien anhand der Ergebnisse der Funktionsanalyse aus Schritt 6) und unter Zugrundelegung der erwarteten Entwicklung der Endlagersysteme aus Schritt 5) sowie standortspezifischen Gegebenheiten.

### **3 Darstellung der Elemente und der durchgeführten Arbeiten**

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten hinsichtlich der Hauptelemente Systemkomponenten, FEP und Sicherheitsfunktionen für die in Kapitel 2 vorgestellte methodische Vorgehensweise beschrieben. Zu nennen sind hier die in Kapitel 3.1 dokumentierte Aufstellung und Einteilung der Systemkomponenten und deren Verwendung als verknüpfendes Element für die weiteren Hauptelemente FEP und Sicherheitsfunktionen. Im Kapitel 3.2 wird auf die Ermittlung einer FEP Datengrundlage, deren Einengung auf möglicherweise relevante FEP sowie schließlich die Zuordnung dieser FEP zu den Systemkomponenten eingegangen. Das Kapitel 3.3 beinhaltet die Beschreibung der Vorgehensweise und die Festlegung von wesentlichen Sicherheitsfunktionen aus einer zuvor zusammengestellten Datengrundlage unter Abstimmung mit dem Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“.

#### **3.1 Systemkomponenten**

Als Systemkomponenten (SK) eines Endlagers werden hier technische oder natürliche Barrieren verstanden, denen einzeln oder im Zusammenwirken sicherheitsgerichtete Eigenschaften zugeschrieben werden können.

Der Begriff „Systemkomponente“ beinhaltet somit sowohl einzelne Endlagerkomponenten als auch Teilsysteme des Gesamtsystems, da einzelne Endlagerkomponenten zu Teilsystemen zusammengefasst werden können. Die Teilsysteme können wiederum zu übergeordneten Teilsystemen bis hin zum Gesamtsystem verbunden werden.

Den Systemkomponenten (SK) kommt in dem hier vorliegenden Teilvorhaben 3607R02580 eine grundlegende Rolle zu. Auf der einen Seite werden den SK aufgrund ihrer sicherheitsgerichteten Eigenschaften Sicherheitsfunktionen (SF) zugeordnet (Beispiel: Abfallbehälter – Isolation) und auf der anderen Seite wirken die FEP in unterschiedlicher Weise auf die SK ein. Die SK verknüpfen somit die FEP und die SF. Über diese gemeinsame Verknüpfung wird die Durchführung einer Funktionsanalyse ermöglicht. Die Funktionsanalyse beinhaltet die methodische Untersuchung aller möglichen Einfluss nehmenden FEP auf die SF des Endlagersystems und seiner Umgebung. Das Ergebnis der Funktionsanalyse ist dann letztendlich bestimmend für die Identifizierung und Festlegung der Szenarien.

In den folgenden Unterkapiteln 3.1.1 bis 3.1.3 wird auf die Einteilung der SK und der Struktur in Bezug auf die angestrebte Verwendung in einer Datenbankumgebung eingegangen. Ferner erfolgt die Beschreibung der einzelnen SK. Abschließend werden konzeptspezifische Unterschiede dargestellt.

### **3.1.1 Einteilung/ Struktur der Systemkomponenten**

Ziel ist es eine schematische Beschreibung zu finden, die für die verschiedenen Endlagerkonzepte in Ton und Salz zur Anwendung kommen kann. Die Endlagerkonzepte beruhen auf dem physischen Aufbau und der Funktionsweise des Multibarrierensystems, dessen geschachtelte Struktur in Abb. 3.1 schematisch dargestellt ist.

Die schematische Darstellung der Abb. 3.1 wird aus Komponenten und Teilsystemen zusammengesetzt. Die Komponenten sind Abfall, Fixierungsmittel, Abfallbehälter, Versatz, geotechnische Barriere, weitere Barrieren Restgrube (z. B. Abdichtbauwerke), einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Wirtsgestein und geologische Umgebung. Die Teilsysteme sind Abfallprodukt, Abfallbinde, Einlagerungsbereich, Endlagerbergwerk, Endlager, Endlagersystem und das Gesamtsystem inklusive der Biosphäre. Die Definitionen sind in Kapitel 3.1.2 gegeben. Das Teilsystem Abfallprodukt kann beispielsweise die SK Abfall und Fixierungsmittel beinhalten.

Die SK können weiter differenziert werden. So weisen beispielsweise Abfälle (hochaktiver Abfall, verglaster Abfall, Brennelemente usw.) eine Fixierung in unterschiedlichen Materialien (Glas, Zement) auf oder liegen ohne Fixierung vor. Die Tabelle 3.1 zeigt weitere mögliche Untergruppen.

Die so erhaltene schematische Abbildung der physischen Struktur des Multibarrierensystems erlaubt eine übersichtliche Darstellung und eine Zuordnung von FEP und sicherheitsgerichteten Eigenschaften.

Die Darstellung des Schachtverschlusses über mehrere Teilsysteme hinweg beruht auf dessen Ausdehnung und Lage (Strecke, Schacht) und kann je nach Endlagerungskonzept verschiedenen oder mehreren Teilsystemen zugeordnet werden. In erster Line soll der Schachtverschluss die sicherheitsgerichteten Eigenschaften des ewG wiederherstellen, die durch das Abteufen eines Schachtes oder durch das Auffahren einer Strecke beeinträchtigt wurden. Dies wird in Abb. 3.1 schematisch durch eine abgewinkelte Form (bestehend aus Schachtverschluss und Schacht) angedeutet.

Die konzeptspezifischen Unterschiede der Systemkomponenten werden in Kapitel 3.1.3 beschrieben.

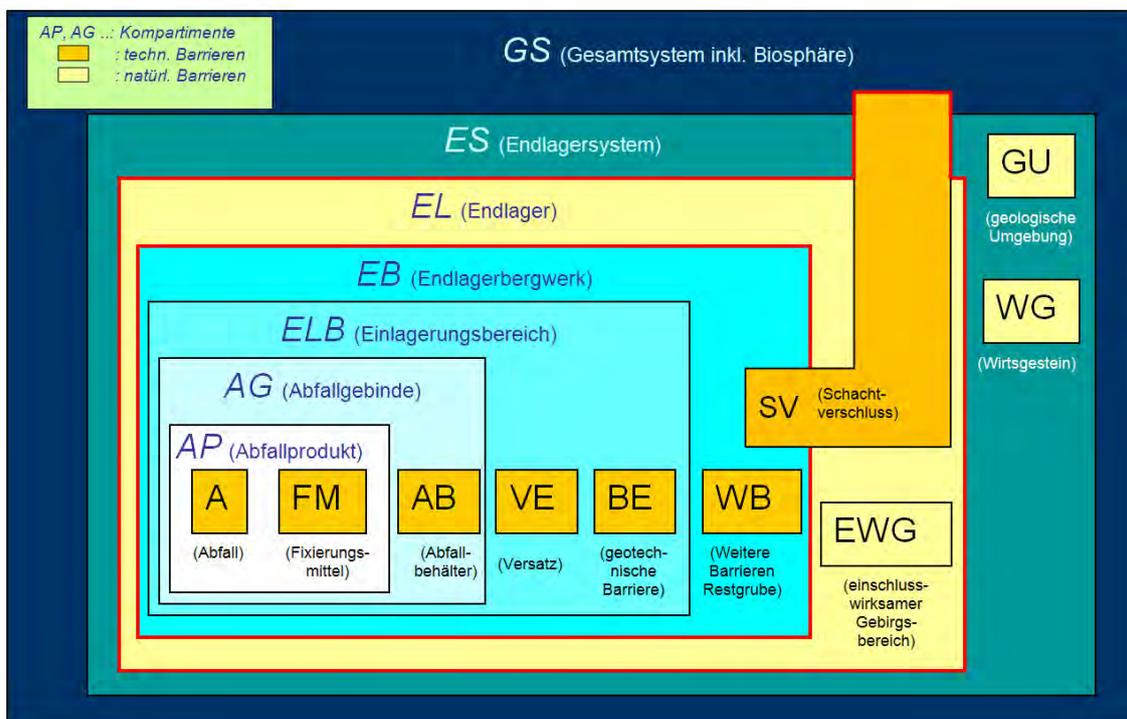


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Systemkomponenten in einem Endlager-System und seiner Umgebung

Tab. 3.1: Auflistung möglicher weiterer Untergruppen zu den Systemkomponenten

SK_NR	Ident_NR	SK_Kurz	SK_Name
3	1.	AP	Abfallprodukt
1	1.1	A	Abfall
1	1.1.1	HAW	Hochaktiver Abfall
1	1.1.1.1	VW	Verglaster Abfall
1	1.1.1.2	ABE	Abgebranntes Brennelement
1	1.1.1.2.1	ABEBWR	Abgebranntes Brennelement aus Siedewasserreaktor
1	1.1.1.2.2	ABEPWR	Abgebranntes Brennelement aus Druckwasserreaktor
1	1.1.1.2.3	THTR/AVR	Brennelemente
1	1.1.2	MAW	Mittelaktiver Abfall
2	1.2	FM	Fixierungsmittel
2	1.2.1	GS	Glasschmelze
2	1.2.2	Z	Zement
5	2.	AG	Abfallgebinde
4	2.1	AB	Abfallbehälter
4	2.1.1	BEB	Brennelement Behälter
4	2.1.2	GKB	Glaskokillen Behälter
4	2.1.3	CSDB	CSD Kokillen Behälter
8	3.	ELB	Einlagerungsbereich
6	3.1	VE	Versatz
6	3.1.1	SG	Salzgrus
6	3.1.2	BT	Bentonit
6	3.1.2.1	FEBEX	Spanische Bentonitrezeptur
6	3.1.2.2	MX80	Wyoming Bentonit
7	3.2	BE	Geotechnische Barriere
7	3.2.1	SKV	Streckenverschluss
7	3.2.2	BV	Bohrlochverschluss
7	3.2.3	KV	Kammerverschluss
7	3.3	EF	Einlagerungsfeld
7	3.3.1	SLF	Streckenlagerungsfeld
7	3.3.2	BLF	Bohrlochlagerungsfeld
11	4.	EB	Endlagerbergwerk
9	4.1	WB	Weitere Barrieren Restgrube (außerhalb des ELB)
10	4.2	SV	Schachtverschluss
13	5.	EL	Endlager
12	5.1	EWG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
16	6.	ES	Endlagersystem
14	6.1	WG	Wirtsgestein
14	6.1.1	T	Ton
14	6.1.1.1	VT	Verfestigter Ton
14	6.1.1.2	PT	Plastischer Ton
14	6.1.2	S	Salz
15	6.2	GU	Geologische Umgebung
15	6.2.1	DG	Deckgebirge
15	6.2.2	NG	Nebengebirge
17	7.	GS	Gesamtsystem inklusive Biosphäre

### 3.1.2 Grundlage und Beschreibung

Die nachfolgenden Definitionen der Systemkomponenten und Teilsysteme wurden /GRS 07/ entnommen und ergänzt.

**Radioaktiver Abfall (A)** sind die zu entsorgenden Radionuklide und Stoffe ohne weitere Verwendungsmöglichkeit. Im Projekt VerSi werden wärmeentwickelnde Abfälle betrachtet.

**Fixierungsmittel (FM)** ist das ausgehärtete Fixierungsmittel (Glas, Zement), in dem radioaktiver Abfall verarbeitet ist.

**Abfallprodukt (AP)** ist verarbeiteter radioaktiver Abfall ohne Verpackung oder unverarbeiteter radioaktiver Abfall in einer Verpackung (Teilsystem).

**Abfallbehälter (AB)** ist der Behälter zur Aufnahme eines Abfallprodukts (z. B. Fass, Betonbehälter, Gussbehälter, Container).

**Abfallgebilde (AG)** ist die endzulagernde Einheit aus Abfallprodukt und Abfallbehälter (Teilsystem).

**Versatz (VE)** ist das Material zur Verfüllung durch den Bergwerksbetrieb aufgefahrenen Hohlräumen und Strecken.

**Geotechnische Barriere (BE)** ist eine geotechnische Einrichtung mit sicherheitsgerichteten Anforderungen zur Rückhaltung und Isolation von Radionukliden.

**Einlagerungsbereich (ELB)** (Teilsystem) ist der Bereich des Bergwerks mit eingelagerten Abfällen.

**Weitere Barrieren Restgrube (WB)** sind technische Einrichtungen mit sicherheitsgerichteten Anforderungen zur Rückhaltung und Isolation von Radionukliden.

**Endlagerbergwerk (ELB)** ist das vollständige Bergwerk mit Infrastruktur und Schacht (Teilsystem).

**Schachtverschluss (SV)** ist Teil des stillgelegten Bergwerks.

**Einschlusswirksamer Gebirgsbereich** (ewG) ist der geologische Teil des Endlagers, das im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (Schachtverschluss) die Isolation der Abfälle sicherstellen muss.

Das **Endlager** (EL) ist der Teil des Endlagersystems, in den hochradioaktive Abfälle eingelagert werden. Das Endlager umfasst das Endlagerbergwerk, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und das Wirtsgestein. Es wird nach Beendigung des Einlagerungsbetriebs der Abfälle im Endlagerbergwerk durch Stilllegung und Verschluss der Zugänge in den wartungsfreien Zustand überführt (Teilsystem).

**Wirtsgestein** (WG) ist das Gebirge, in das die hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden bzw. das Endlager errichtet wird.

**Geologische Umgebung** (GU) sind die umgebenden Gesteine des Wirtsgesteins.

**Endlagersystem** (ES) umfasst das Endlager sowie seine geologische Umgebung, die alle Gebirgsbereiche einschließt, die für den Nachweis der Einhaltung der Sicherheitsprinzipien und Schutzziele der Endlagerung betrachtet werden müssen.

**Biosphäre** ist generell definiert als die Gesamtheit der mit lebenden Organismen besiedelten Bereiche der Erde.

**Gesamtsystem inklusive Biosphäre** (GS) beinhaltet alle strukturellen Teilsysteme und die durch Organismen belebte Umwelt.

### 3.1.3 Konzeptspezifische Unterteilung

Die Endlagerkonzepte für die Wirtsgesteine Ton /GRS 08f/ und Salz /DBE 98/ bzw. /GRS 08g/ können trotz der unterschiedlichen Ausführungen von Systemkomponenten auf die schematische Darstellung der Abbildung 3.1 übertragen werden. Die wichtigsten physischen Unterschiede der Komponenten und Teilsysteme werden dem Schema der Abbildung 3.1 folgend beschrieben, da die spätere Zuordnung von sicherheitsgerichteten Eigenschaften und FEP davon bestimmt wird.

Das Teilsystem Abfallprodukt weist keine physischen Unterschiede der Systemkomponenten Abfall und Fixierungsmittel auf, da für beide Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Ton und Salz von gleichen Abfällen und Abfallfixierungen ausgegangen wird. Eine Übersicht hinsichtlich allgemeiner abfallspezifischer Merkmale sowie konzept- und standortspezifischer Planungen ist in Abbildung 3.2 wiedergegeben.

Rohabfälle, Abfallprodukte und Abfallgebände im Zusammenhang mit dem VerSi Vorhaben					
	Sachverhalte	HAW		MAW	
Zwischenlagerung	Sachverhalte zur Zwischenlagerung				
Standortnahe ZWL, Ahaus, Gorleben	Abfallart / Rohabfall	Bestrahlte Brennelemente	Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung	Hülsen & Endkappen aus der Wiederaufarbeitung	Prozßwässer aus der Wiederaufarbeitung
	Konditionierungsvorgänge zur Zwischenlagerung	Ziehen der BE aus dem Abklingbecken im KKW und Einstellen in Transport- und Zwischenlagerbehälter vom Typ Castor V/19 bzw. V/52	Einmischen des Rohabfalls in flüssiges Glas, Abfüllen der Glasfritte in Kokillen (CSD-V) Einstellen der CSD-V in Zwischenlagerbehälter vom Typ Castor 20/28	Kompaktierung des Rohabfalls, Einstellen von Presslingen in Kokillen (CSD-C), Einstellen der CSD-C in Zwischenlagerbehälter vom Typ TGC 36	Einmischen des Rohabfalls in flüssiges Glas, Abfüllen der Glasfritte in Kokillen (CSD-B) Einstellen der CSD-B in Zwischenlagerbehälter vom Typ TGC 36
	Abfallgebände im Zwischenlager	CASTOR V/19 mit 19 DWR BE CASTOR V/52 mit 52 SWR BE	CASTOR 20/28 mit 28 CSD-V	TGC 36 mit 36 CSD-C	TGC 36 mit 36 CSD-B
Wirtsgestein	Sachverhalte zur Endlagerung				
Salz	Konditionierungsvorgänge zur Endlagerung	Zerlegung der BE in Brennstäbe und BE-Skelett, Verpacken beider Abfallströme in POLLUX-Behälter Alternativ: Verpacken der Brennstäbe in BSK	keine	keine	keine
	Abfallprodukt	Brennstäbe bzw. kompaktiertes BE-Skelett	Glaskörper	kompaktiertes Zrkaloy	Glaskörper
	Endlagerbehälter/ Abfallgebände	POLLUX bzw. BSK	CSD-V	CSD-C	CSD-B
	Einlagerung	POLLUX: Streckenlagerung BSK: Bohrlochlagerung	Bohrlochlagerung	Bohrlochlagerung	Bohrlochlagerung
	Versatz im Einlagerungsbereich	Salzgrus	Salzgrus	Salzgrus	Salzgrus
Ton	Konditionierungsvorgänge zur Endlagerung	Einstellen der BE in Stahlbehälter, Behälterkapazität begrenzt durch 1.500 W pro Behälter	Einstellen einzelner CSD-V in Stahlbehälter	Einstellen von 9 CSD-C in Betoncontainer, Resthohlraum wird mit Zementmörtel verfüllt	Einstellen von 9 CSD-B in Betoncontainer, Resthohlraum wird mit Zementmörtel verfüllt
	Abfallprodukt	Brennelement	CSD-V	zementierte CSD-C	zementierte CSD-B
	Endlagerbehälter/ Abfallgebände	Stahlbehälter	Stahlbehälter	Betoncontainer	Betoncontainer
	Einlagerung	Streckenlagerung	Streckenlagerung	Streckenlagerung	Streckenlagerung
	Versatz im Einlagerungsbereich	Bentonit	Bentonit	Zementmörtel	Zementmörtel

Abb. 3.2: Übersicht von charakteristischen abfallspezifischen Planungsmerkmalen im Zusammenhang mit dem Verbundvorhaben VerSi (aus /PEI 08/ entnommen)

Unterschiede in der Ausführung bestehen beim Teilsystem Abfallgebände. Im Wirtsgestein Salz ist eine Einlagerung der Kokillen in Bohrlöchern ggf. in Strecken vorgesehen während im Wirtsgestein Ton zusätzliche Abfallbehälter für eine Streckenlagerung vorgesehen sind. Der Unterschied zwischen Strecken- bzw. Bohrlochlagerung je nach Wirtsgestein ist als zunächst rein technisch bedingte Maßnahme nicht als sicherheitsrelevante Systemkomponente berücksichtigt.

Im Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Ton wird sowohl Bentonit als auch Mörtel als Versatzmaterial vorgesehen, während für das Wirtsgestein Salz Eigenversatz in Form von Salzgrus vorgesehen ist. Grundsätzlich werden die gleichen sicherheitsbezogenen

Eigenschaften gefordert, jedoch sind diese aufgrund der materialspezifischen Unterschiede (Plastizität, Porenraumverteilung, Zusammensetzung) unterschiedlich relevant und quantifizierbar. Beispielsweise ist die Verzögerung des Radionuklidtransports durch Sorption für das Versatzmaterial Bentonit bedeutend während eine Sorption im Versatzmaterial Salzgrus als unbedeutend eingestuft werden kann.

Abdichtbauwerke (Dämme) für Einlagerungsbereiche sind sowohl im Wirtsgestein Ton als auch im Wirtsgestein Salz vorgesehen. Prinzip- und konstruktionsbedingt bestehen hier erhebliche Unterschiede, wie die Abdichtung gegen Lösungszutritte (Quellung bei Aufsättigung bzw. Porositätsverminderung durch Konvergenz) erreicht wird. Dies hat einen bedeutenden Einfluss auf die Wirkung der FEP auf diese Systemkomponente und deren Zuordnung.

Sofern weitere Systemkomponenten als technische Barrieren im Endlagerbergwerk vorgesehen sind, sind konzeptspezifische Unterschiede zu erwarten.

Die Systemkomponente ewG weist anforderungsbedingt erhebliche physische Unterschiede in den Endlagerkonzepten für die Wirtsgesteine Ton und Salz auf. Dem dichten Einschluss durch den ewG im Wirtsgestein Salz für den geforderten Zeitraum stehen die transportverzögernden Eigenschaften des ewG im Wirtsgestein Ton sowie deren unterschiedliche physische Ausdehnung gegenüber.

Die Endlagerkonzepte unterscheiden sich in der Bedeutung und in der möglichen Lage des Schachtverschlusses als Systemkomponente. Im Endlagerkonzept für das Wirtsgestein Ton liegt der Schachtverschluss zwingend im ewG aufgrund dessen physischer Ausdehnung. Ein Schachtverschluss ist auch im Salzkonzept aus bergbaulichen Gründen zwingend notwendig. Die Wiederherstellung des ewG muss jedoch aufgrund dessen kleinerer Ausdehnung nicht zwingend durch den Schachtverschluss sondern kann auch durch einen Streckenverschluss als weitere Barriere (Systemkomponente) erfolgen. Dennoch kann neben den bergbaulichen Anforderungen auch die Anforderung an den Schachtverschluss bestehen, gegebenenfalls zusätzliche, Wirtsgesteinsbereiche wiederherzustellen, die sich oberhalb des ewG anschließen.

Die weiteren Systemkomponenten, Wirtsgestein bzw. geologische Umgebung, weisen unterschiedliche Eigenschaften auf, die im jeweiligen Endlagerkonzept berücksichtigt sind /GRS 08e, GRS 08f/.

## **3.2 Relevante Faktoren**

Der Startpunkt vieler durchgeführter Szenarientwicklungen in den verschiedenen Ländern ist auf die Sammlung sog. möglicher Einflussgrößen auf das Endlagersystem ausgerichtet. Auch in diesem Vorhaben wurde in den ersten Arbeitsschritten der Schwerpunkt auf die Erstellung einer Datenbasis von relevanten Faktoren gesetzt. Die relevanten Faktoren sind hierbei der Sammelbegriff für das in der Szenarientwicklung etablierte englische Akronym FEP das für Features, Events und Processes steht. Nach /GRS 04/ sind FEP folgendermaßen definiert:

- Ein „Feature“ ist ein Aspekt oder eine Bedingung eines Endlagersystems, das die Freisetzung oder den Transport eines Kontaminanten beeinflusst.
- Ein „Event“ ist ein natürliches oder anthropogenes Ereignis, das während eines kleinen Teils des interessierenden Zeitrahmens eintritt. Ein „Event“ ist also ein Kurzzeit-Phänomen.
- Ein physikalischer „Process“ ist ein natürliches oder anthropogenes Ereignis, das während eines signifikanten Teils des interessierenden Zeitrahmens eintritt. Ein „Process“ ist ein Langzeit-Phänomen.

Die folgenden Unterkapitel (3.2.1 – 3.2.4) dokumentieren den Arbeitsstand hinsichtlich der Erstellung der FEP-Datenbasis mit dem zugrundeliegenden strukturellen Aufbau, der Einengung der Datengrundlage auf die möglicherweise relevanten FEP sowie der Zuordnung der FEP zu den in Kapitel 3.1 beschriebenen Systemkomponenten.

### **3.2.1 Einteilung/ Struktur der FEP-Datenbasis**

Die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens aufgebaute FEP-Datenbasis (siehe Kapitel 3.2.2) lässt sich in die folgenden Hauptgruppen einteilen:

- Natürliche Phänomene,
- Anthropogen induzierte Phänomene und
- Abfall und Endlager induzierte Phänomene.

Die genannten Hauptgruppen lassen sich wiederum in Untergruppen unterteilen, unter denen dann eine Zuordnung der einzelnen FEP erfolgt. In Abbildung 3.3 ist die Einteilung der FEP in Haupt- und Untergruppen schematisch dargestellt.

Die Einteilung der FEP in eine Struktur ist für die Ableitung von Szenarien nicht zwingend erforderlich, jedoch bietet eine systematische Zuordnung im Umgang mit der Datenbasis einige Vorteile. Zu nennen sind hier die Übersichtlichkeit und die thematische Konzentration von FEP in den Untergruppen. Hierdurch wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben sich im Gegensatz zu einer strukturfreien Auflistung der FEP einen schnellen Überblick zu verschaffen. Zusätzlich wird durch eine systematisierte Datenablage die fachliche Diskussion z. B. über die Einflussnahme eines bestimmten FEP oder einer Gruppe von FEP erleichtert. Darüber hinaus bietet die Struktur im Bedarfsfall durch weitere Bildung von Gruppen und darin eingehenden FEP genügend Flexibilität. D. h., das Hinzufügen und Löschen von FEP, Untergruppen und ggf. Hauptgruppen ist möglich, ohne den prinzipiellen Aufbau der Einteilungsstruktur zu gefährden.

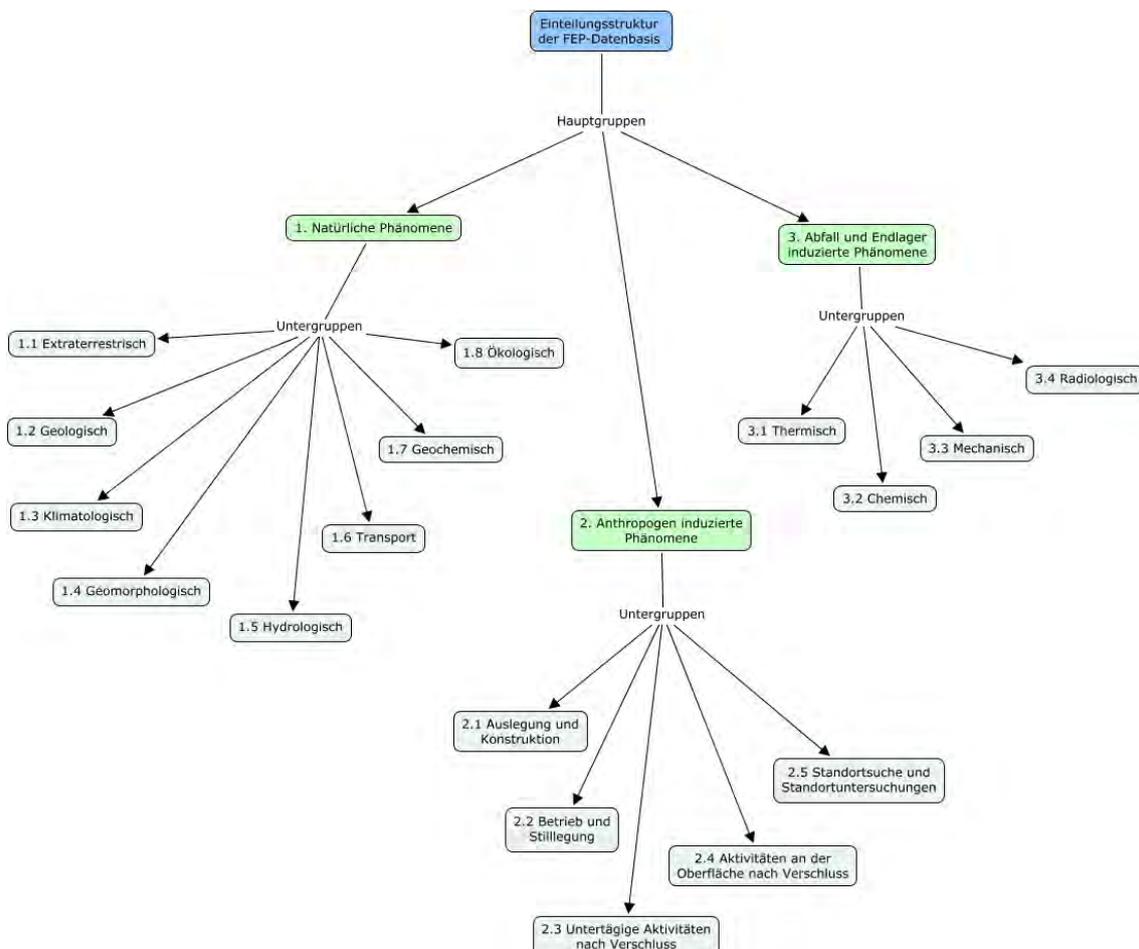


Abb. 3.3: Darstellung der Einteilungsstruktur von FEP in Haupt- und Untergruppen

### 3.2.2 Datengrundlage der FEP

Hinsichtlich der Sammlung von FEP zur Erstellung einer Datengrundlage lassen sich aus der Vorgehensweise zur Szenarientwicklung prinzipiell folgende Herangehensweisen ausmachen:

- Aufbauend auf Eigenentwicklungen einer FEP-Datenbasis erfolgt ein Abgleich mit externen Datenbanken wie z. B. die NEA International FEP Database. Der Abgleich dient zur Verifizierung und ggf. als Grundlage für Erweiterungen bzw. Ergänzungen der Eigenentwicklung.
- Aufbauend auf bestehenden externen Datenbanken (s. o.) werden konzept- und standortspezifische FEP hinzugefügt.

Für das vorliegende Vorhaben 3607R02580 ist die erste Option gewählt worden. D. h., unter Einbeziehung einer bestehenden FEP-Sammlung, die im Folgenden Ausgangsliste genannt wird, erfolgte eine Verifizierung und ein Abgleich mit externen FEP-Datengrundlagen. Die Ausgangsliste bezieht sich auf einen fiktiven Standort in einem Salzstock und ist im Rahmen eines Workshops zur Szenarientwicklung als Datengrundlage herangezogen worden /GRS 00/. Obwohl diese FEP-Sammlung im Hinblick auf einen Salzstock zusammengetragen wurde, kann sie aufgrund der mehrheitlichen Übertragbarkeit der FEP auf einen Tonstandort als Ausgangsliste für beide Standorte dienen.

Die zur Prüfung und als Grundlage für eine Erweiterung herangezogenen FEP-Datengrundlagen sind im Folgenden aufgeführt:

- NEA (2006) International NEAFEP Database V2.1 /NEA 06a/
- NAGRA (2007) Opalinuston FEP-Screening /NAG 07/
- ISIBEL (2008) Salzstock FEP-Katalog /ISI 08/
- GSF (2004) ASSE FEP-Datenbasis /GSF 04/
- BGR (2001) Gorleben FEP-Zusammenstellung /BGR 01/

Neben den o. g. Datengrundlagen liegen weitere FEP Zusammenstellungen vor, wie z. B. der FEPCAT sowie FEP-Listen der WIPP und aus dem EU Projekt BENIPA. Diese Datengrundlagen wurden bereits in dem orientierenden Arbeitsschritt zur Sichtung von vorliegenden FEP berücksichtigt /GRS 08a/. Aufgrund der spezifischen Ausprä-

gung dieser FEP sind sie für den Abgleich nicht einbezogen worden. Jedoch haben diese Datengrundlagen weiterhin als zusätzliche Informations- bzw. Bezugsquelle für das Vorhaben und eine spätere Anwendung der Methodik ihre Bedeutung.

Die Tabelle 3.2 gibt einen Überblick hinsichtlich der Anzahl an FEP in den jeweiligen FEP-Datengrundlagen.

Eine wesentliche Anforderung an eine FEP-Datengrundlage ist deren möglichst umfassende Zusammenstellung, da hieraus bzw. nach Kondensierung der Grundlage auf die wesentlichen Phänomene (siehe Kapitel 3.2.3) die zu behandelnden Szenarien in den Langzeitsicherheitsanalysen abgeleitet werden. Um eine möglichst umfassende Zusammenstellung der FEP-Datengrundlage zu generieren ist wie bereits oben beschrieben die Ausgangsliste mit den in Tabelle 3.2 aufgeführten externen Datengrundlagen abzugleichen.

Tab. 3.2: Überblick über die verwendeten FEP-Datengrundlagen zur Erstellung der FEP-Datenbasis für das Teilvorhaben 3607R02580

Datengrundlage bzw. Datenquelle	Bezug	Anzahl an FEP	Anmerkung
GRS Ausgangsliste	Salz	95	Anzahl an FEP vor dem Abgleich
NEA International FEP Database	allgemein	150	wird implizit in ISIBEL berücksichtigt
NAGRA FEP-Screening	Opalinuston	86	Selektion der wesentlichen FEP im Opalinuston
Vorhaben ISIBEL FEP-Katalog	Salzstock	170	stellt den Bezug zur NEA FEP Database her
ASSE FEP-Datenbasis	Salzstock	268	Ohne ASSE spezifische FEP
BGR FEP- Zusammenstellung	Salzstock	75	Gorleben spezifische FEP

Der in diesem Vorhaben durchgeführte Abgleich erfolgte derart, dass zunächst geprüft wurde, ob zu jedem FEP der externen Datengrundlage ein entsprechendes FEP in der Ausgangsliste vorliegt. Wobei entsprechendes FEP nicht zwangsläufig eine exakte Übereinstimmung im Wortlaut oder Bezugsbereich mit dem FEP der externen Datengrundlage beinhalten musste, sondern es ausgereicht hat, wenn die FEP auf der Basis fachlicher Einschätzung eine gemeinsame thematische Schnittmenge bilden. Bei diesem Abgleichprozess war in vielen Fällen festzustellen, dass zu einem FEP der exter-

nen Datengrundlage mehrere FEP aus der Ausgangsliste zugeordnet werden konnten und umgekehrt. Im Falle, dass kein entsprechendes FEP in der Ausgangsliste vorliegt, wurde die Liste um das FEP aus der externen Datengrundlage gemäß der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Struktur erweitert.

Nach der beschriebenen Prozedur ist die Anzahl an FEP der Ausgangsliste von 95 auf 137 angestiegen. Das Ergebnis des Datenabgleichs ist in einer Excel Tabelle abgelegt worden und als Anhang 1 diesem Bericht beigefügt.

Die erstellte FEP-Datengrundlage für das Vorhaben 3607R02580 enthält folgende Datenfelder:

- Strukturfelder
  - Hauptgruppe (Nr. und Name),
  - Untergruppe (Nr. und Name) und
  - FEP (Nr. und Name)
- Eigenschaftsfelder
  - FEP-Art (ob es sich bei dem FEP um ein Feature oder Event oder Process handelt),
  - Bezug (ob das FEP sich auf Salz oder Ton oder auf beide bezieht) und
- Bemerkungsfeld (enthält einen entsprechenden Vermerk, wenn das FEP neu aufgenommen wurde)

Die Tabelle 3.3 enthält einige statistische Angaben zur generierten FEP-Datengrundlage. Aus der Tabelle (siehe hierzu auch Anhang 1) kann man entnehmen, dass sich bis auf wenige Ausnahmen die FEP auf die beiden Wirtsgesteine Salz und Ton beziehen. Hieraus ist jedoch nicht ableitbar, dass das entsprechende FEP auf die beiden Systeme eine gleiche Wirkung ausübt oder Eintrittswahrscheinlichkeit aufweist. Hinsichtlich der FEP-Art ist die Anzahl von Zuständen (F) und Prozessen (P) fast gleich. Die Anzahl an Ereignissen (E), die nach der Definition als Kurzzeit-Phänomene charakterisiert werden, nimmt ca. 9% der Gesamtzahl an FEP ein.

Tab. 3.3: Statistische Angaben zur generierten FEP-Datengrundlage

Bezug		Anzahl
Struktur	Hauptgruppen	3
	Untergruppen	17
Phänomen	F	64
	E	12
	P	61
	Summe (FEP)	137
Wirtsgestein	Salz	7
	Ton	2
	Salz und Ton	128
	Summe	137

### 3.2.3 Relevanz und Ausschluss von FEP

In Kapitel 3.2.2 wurde die generierte FEP-Datengrundlage beschrieben. Mit der Generierung einer Datengrundlage ist der Anspruch verbunden, möglichst umfassend zu sein. Die Gründe hierfür liegen vor allem darin, dass die Datengrundlage bestimmend ist für die Ableitung von Szenarien und das für die angestrebte Vergleichsmethodik im Verbundvorhaben VerSi bei einer zukünftigen Anwendung eine gewisse Flexibilität bei möglichen veränderten Randbedingungen vorliegt. Für die praktische Nutzung der Datengrundlage sind je nach vorliegenden konzeptspezifischen und standortspezifischen Gegebenheiten, Aufgabenstellungen und Rahmenvorgaben nicht alle FEP von Interesse. Das Mitführen von nicht relevanten FEP im gesamten Ablauf des Verfahrens erhöht den Aufwand beträchtlich und ist darüber hinaus auch im Sinne der Übersichtlichkeit nicht förderlich. Es ist daher der begründbare Ausschluss von FEP aus der Datengrundlage vorzunehmen.

Dazu wird die generierte FEP-Datengrundlage auf eine mögliche Reduzierung von FEP geprüft. Hierbei nähert man sich in der Prüfung von zwei Seiten der Datengrundlage um dem genannten Ziel nachzukommen:

- Identifizierung von möglicherweise relevanten FEP (diese FEP werden mit einem entsprechenden Vermerk versehen) und
- Ausschluss von nicht relevanten FEP aus der Datengrundlage.

Im Idealfall bleiben in der FEP-Datengrundlage nur diejenigen FEP übrig, die mit dem Attribut „möglicherweise relevant“ versehen wurden. Es besteht bei dieser Vorgehensweise allerdings auch die Möglichkeit, dass sich FEP in der Datengrundlage befinden, die weder ausgeschlossen noch mit dem Attribut „möglicherweise relevant“ versehen wurden. Diese FEP sind weiterhin in der Datengrundlage mitzuführen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass ein FEP den Vermerk „möglicherweise relevant“ erhält aber dennoch aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen wird, wenn vereinbarte Ausschlusskriterien zutreffen.

Um die FEP mit dem Vermerk „möglicherweise relevant“ zu versehen, sind entsprechend belastbare Hinweise notwendig. Hierzu können dokumentierte und belegte Aussagen, Einschätzungen, Erfahrungen, Expertenmeinungen etc. herangezogen werden.

Zum Ausschluss von FEP führen folgende Kriterien (die Kennziffern in den Klammern dienen zur Kennzeichnung der Ausschlusskriterien in der im Aufbau befindlichen Access Datenbank):

- Aufgrund von Rahmenvorgaben des Vorhabens (10) sind FEP nicht zu berücksichtigen die
  - sich auf das beabsichtigte und unbeabsichtigte menschliche Eindringen in das Endlager beziehen (11),
  - nicht in dem zugrundegelegten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre auftreten bzw. sich nicht signifikant auswirken (12),
  - sich direkt auf Störungen in der Betriebs- oder Verschlussphase beziehen (13) und
  - einen Bezug zur Rückholung der Abfälle haben (14).
- FEP die hinsichtlich beider Endlagersysteme (20)
  - für nicht relevant eingeschätzt werden (21),
  - eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben (22),
  - aufgrund der Standortauswahl oder anderweitig nicht zu erwarten sind (23),
  - nicht vorhersagbar sind und damit einen spekulativen Charakter hinsichtlich Ausmaß und Wirkung aufweisen (24) und

- redundant sind und bereits unter einem anderen FEP abgehandelt werden (25).

Die Excel Tabelle zur FEP-Datengrundlage wird um folgende vier Datenfelder erweitert (siehe Anhang 2):

- „Möglicherweise relevant“ (Eintrag X kennzeichnet, dass das FEP möglicherweise relevant ist, kein Eintrag kennzeichnet, dass keine Einschätzung hinsichtlich der möglichen Relevanz vorliegt bzw. möglich ist),
- „Quelle Relevanz“ (Numerischer Eintrag, der die Bezugsquelle mit der entsprechenden Aussage zur Relevanz angibt)
- „Ausgeschlossen“ (Eintrag z. B. die Kennziffer 11)
- „Quelle Ausschluss“ (Numerischer Eintrag, der die Bezugsquelle mit der entsprechenden Aussage oder dem Sachverhalt für einen Ausschluss angibt).

Nachfolgend sind die herangezogenen Bezugsquellen für die Auswertung und die entsprechenden vergebenen numerischen Werte für den Datenfeldeintrag aufgelistet:

- (1) für NAGRA (2007) FEP-Screening (Opalinuston) /NAG 07/
- (2) für ISIBEL (2008) FEP-Katalog (Salzstock) /ISI 08/
- (3) für COLENCO (2005) Eigenschaften, Charakterisierung von Barrieren (Salz und Tonstein) /COL 05/
- (4) für GRS (2008) Einschätzung der Relevanz von Betrachtungsfällen (Opalinuston) /GRS 08c/
- (5) für GRS (2008) Vorgaben und Rahmenbedingungen (Salz und Tonstein) /GRS 08a/
- (6) für AkEnd (2002) Ausschlusskriterien für die Standortauswahl (Salz und Tonstein) /AKE 02/
- (7) für eigene Einschätzungen oder Einschätzungen aus Fach- und Projektgesprächen im Verbundvorhaben VerSi.

Im Folgenden wird die durchgeführte Auswertung unter Einbeziehung der genannten Bezugsquellen und Ausschlusskriterien dargestellt:

### Identifizierung von möglicherweise relevanten FEP:

In einem ersten Schritt wurden alle FEP mit dem Attribut „möglicherweise relevant“ versehen die einen Bezug zu den identifizierten wesentlichen 52 FEP nach dem FEP Screening der NAGRA /NAG 07/ haben. Insgesamt 35 FEP der Datengrundlage wurden in diesem Schritt gekennzeichnet (siehe Anhang 2).

Im zweiten Schritt wurden Informationen des ISIBEL FEP-Kataloges /ISI 08/ ausgewertet die Hinweise auf FEP geben, die möglicherweise relevant sind. Hinweise waren dann gegeben, wenn folgende Kriterien als sog. Und-Verknüpfungen vorlagen:

- In dem ISIBEL-Datenfeld „Einwirkung auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren“ darf nicht der Eintrag „nicht zutreffend“ vorliegen (anders ausgedrückt, muss in dem Datenfeld entweder der Eintrag „direkt“ oder „indirekt“ vorliegen).
- In mindestens einem der vier Felder („Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ und „Deck- und Nebengebirge“) unter dem Titel „Handhabung“ musste der Eintrag „wird berücksichtigt“ vorliegen.

Bei entsprechenden Hinweisen und einem Bezug zur FEP-Datengrundlage erfolgt zu dem FEP der Eintrag „möglicherweise relevant“. Die Auswertung des ISIBEL FEP-Kataloges und unter Berücksichtigung eines Bezuges zur FEP-Datengrundlage führte zu 66 FEP die einen entsprechenden Eintrag erhalten (siehe Anhang 2). Hierzu ist noch anzumerken, dass eine Reihe von identifizierten FEP aus dem ersten Schritt sich auch im zweiten Schritt wiederfinden. Das betrifft auch die nächsten Schritte zur Identifizierung von möglicherweise relevanten FEP.

Der nächste Schritt war mit der Auswertung von Informationen aus dem Bericht /COL 05/ verknüpft und insbesondere die darin dargestellten Tabellen 5-1 und 6-1, die Einschätzungen zur Relevanz von charakteristischen Barriereneigenschaften für Salinar und für Tonstein enthalten. Die Angaben aus den Tabellen sind nicht direkt auf die FEP-Datengrundlage übertragbar. Jedoch besteht zu den genannten Barriereneigenschaften ein indirekter Bezug zu den FEP.

Zur Relevanz macht der Bericht folgende Aussagen /COL 05/:

- „Für die Bewertung der Barriereneigenschaften ist in erster Linie ihre Relevanz maßgeblich. Dabei geht es darum, wie wesentlich die entsprechende Eigenschaft für die Sicherheit des Endlagersystems ist. ...“

Die Wertung der Relevanz zu den Barriereneigenschaften wurde im Bericht /COL 05/ wie folgt vorgenommen:

- \*\*\* hoch: maßgebende charakteristische Eigenschaft einer wichtigen Barriere
- \*\* mäßig: sekundäre Eigenschaft einer wichtigen Barriere oder maßgebende Relevanz Eigenschaft einer sekundären Barriere
- \* gering: sekundäre Eigenschaft einer sekundären Barriere oder Eigenschaft einer Barriere geringer Bedeutung

Für die Auswertung wurden alle Barriereneigenschaften mit der Wertung „\*\*\*“ für die Relevanz herangezogen. Diejenigen FEP aus der FEP-Datengrundlage, die einen Bezug zu den zugrundegelegten Barriereneigenschaften aufweisen werden mit dem Attribut „möglicherweise relevant“ versehen. Die Auswertung hat insgesamt 35 FEP ergeben, die das entsprechende Attribut erhalten (siehe Anhang 2).

Im letzten Schritt wurden die von der GRS vorgenommenen Einschätzungen zur Relevanz von Betrachtungsfällen /GRS 08c/, die die NAGRA im Projekt Opalinuston (Entsorgungsnachweis) /NAG 02/ aufgestellt und dazu Dosisberechnungen durchgeführt hat, herangezogen. Die Einschätzung der Relevanz erfolgte durch Vergleich des ermittelten Summendosismaximums aus dem entsprechendem Betrachtungsfall und dem von der NAGRA zugrundegelegten Referenzfall.

Für die hier angestrebte Auswertung, werden die Betrachtungsfälle einbezogen, die in dem genannten Vergleich der Summendosismaxima eine deutliche Abweichung (größer Faktor 5) aufweisen (siehe Tab. 7.2 in /GRS 08c/). Die in diesen Betrachtungsfällen gegenüber dem Referenzfall variierten Größen werden bei entsprechendem Bezug zur FEP-Datengrundlage mit dem Attribut „möglicherweise relevant“ versehen. Es wurden 25 FEP identifiziert, die das Attribut „möglicherweise relevant“ erhalten (siehe Anhang 2).

#### Ausschluss von FEP:

Der erste Schritt für den Ausschluss von FEP erfolgte unter Abfrage der o. g. Rahmenvorgaben /GRS 08a/. Das Ergebnis der Abfrage (Kennziffer 11 bis 14) ist in Tab. 3.4 wiedergegeben.

Im nächsten Schritt wurden diejenigen FEP ausgeschlossen, die sich nicht relevant auswirken und/ oder eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben. Hierzu wurde der ISIBEL FEP-Katalog /ISI 08/ auf entsprechende Hinweise durchsucht. Bei Vorliegen entsprechender Hinweise und bei einem Bezug zur FEP-Datengrundlage wurde nach zusätzlicher fachlicher Prüfung mit positivem Befund das entsprechende FEP ausgeschlossen. Hinweise waren dann gegeben, wenn folgende Kriterien vorlagen:

- In allen der vier ISIBEL-Datenfeldern („Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ und „Deck- und Nebengebirge“) unter dem Titel „Handhabung“ hat der Eintrag „Nicht zu berücksichtigen“ vorzuliegen.
- In dem ISIBEL-Datenfeld „Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit“ muss der Eintrag „nicht zu betrachten“ ausgewiesen sein.
- Das ISIBEL-Datenfeld „Standortspezifische Auswirkungen“ entsprechende Aussagen enthält wie z. B. keine Auswirkungen im Nachweiszeitraum von 1 Mill. Jahre.
- Das ISIBEL-Datenfeld „Zeitliche Beschränkung“ entsprechende Aussagen enthält wie z. B. die Zeiträume die für die Ausbildung tektonischer Strukturen benötigt werden, liegen über dem Nachweiszeitraum von einer Million Jahren.
- Das ISIBEL-Datenfeld „Bemerkungen“ entsprechende Aussagen enthält wie z. B. die Auswirkungen sind geringfügig, so dass das FEP nicht berücksichtigt werden muss.

Neben den o. g. Hinweisen wurden die AkEnd /AKE 02/ Ausschlusskriterien für eine Standortauswahl in Bezug auf die FEP-Datengrundlage abgefragt sowie eigene Einschätzungen, die zum Ausschluss von FEP führen, vorgenommen. Darüber hinaus sind FEP aufgrund der nicht Vorhersagbarkeit ihres Eintretens, Verlaufes, Ausmaßes und Wirkung vorläufig ausgeschlossen worden. Hierzu sind insbesondere FEP mit Bezug zu menschlichen Aktivitäten und zur Entwicklung der Biosphäre zu zählen. Hinsichtlich dieser FEP muss für das vorliegende Vorhaben noch eine Festlegung getroffen werden.

Das Ergebnis der Prüfung (Kennziffer 21 bis 25) beinhaltet die Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Ausschlusskriterium und Anzahl der ausgeschlossenen FEP

Kennziffer	Ausschlusskriterium	Anzahl der ausgeschlossenen FEP
11	FEP, die sich auf das beabsichtigte und unbeabsichtigte menschliche Eindringen in das Endlager beziehen.	6
12	FEP, die nicht in dem zugrundegelegten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre auftreten bzw. sich nicht signifikant auswirken.	5
13	FEP, die sich direkt auf Störungen in der Betriebs- oder Verschlussphase beziehen.	1
14	FEP, die einen Bezug zur Rückholung der Abfälle haben.	0
21	FEP, die für nicht relevant eingeschätzt werden.	5
22	FEP, die eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben.	3
23	FEP, die aufgrund der Standortauswahl oder anderweitig nicht zu erwarten sind.	4
24	FEP, die nicht vorhersagbar sind und damit einen spekulativen Charakter hinsichtlich Ausmaß und Wirkung aufweisen.	13
25	FEP, die redundant sind und bereits unter einem anderen FEP abgehandelt werden.	1
<b>Summe</b>		<b>38</b>

Insgesamt sind unter Einbeziehung der beiden Gruppen (10 und 20) zu Ausschlusskriterien 38 FEP ausgeschlossen worden. Davon waren 11 FEP betroffen, die für möglicherweise relevant angesehen wurden. Von den verbliebenen 99 FEP haben 78 FEP das Attribut „möglicherweise relevant“.

Das Ergebnis aus der Identifizierung von möglicherweise relevanten FEP und des Ausschlusses von FEP ist im Anhang 2 dargestellt.

### 3.2.4 Zuordnung der relevanten Faktoren zu den Systemkomponenten

In der Beschreibung der methodischen Vorgehensweise in Kapitel 2 ist die Zuordnung der wesentlichen Einfluss nehmenden FEP zu den Systemkomponenten (SK) des Endlagersystems und seiner Umgebung als einer der insgesamt fünf Arbeitsschritte aus-

gewiesen. Die Intention dabei ist, zunächst mögliche Einflussgrößen auf die SK zu identifizieren und die Grundlage für den Bezug zu den Sicherheitsfunktionen zu schaffen. Als Basis für die Zuordnung sind die in Kapitel 3.2.3 identifizierten möglicherweise relevanten FEP und die aufgestellten SK aus Kapitel 3.1.1 herangezogen und in Form einer Matrix angeordnet worden. Eine Zuordnung der FEP zu den SK wurde anhand folgender Einträge vorgenommen:

- Eintrag 1 bedeutet, dass eine direkte Einflussnahme des entsprechenden FEP zur SK gegeben ist.
- Eintrag 2 bedeutet, dass die Einflussnahme des entsprechenden FEP zur SK nachrangig bzw. indirekt ist.
- Eintrag 3 bedeutet, dass eine Einflussnahme des entsprechenden FEP zur SK nicht offensichtlich erkennbar jedoch auch nicht ganz auszuschließen ist.
- Kein Eintrag bedeutet, dass das entsprechende FEP zur SK keinen Einfluss hat.

Die Zuordnung der FEP zu den SK erfolgte derart, dass zu jedem identifizierten möglicherweise relevantem FEP entlang der SK geprüft wurde, ob entweder kein Eintrag vorzunehmen oder ein Eintrag von 1 bis 3 in die o. g. Matrix erforderlich ist. Da das Ergebnis der Zuordnung, wie bereits ausgeführt, eine wesentliche Rolle für die Analyse der Sicherheitsfunktionen und diese wiederum für die Festlegung der Szenarien spielt, wurde die Zuordnung von zwei Mitarbeitern unabhängig voneinander durchgeführt. Anschließend wurden die beiden erstellten Matrizen gegenübergestellt, diskutiert und bei Bedarf abgeglichen. Das Ergebnis vom Abgleich ist dem Anhang 3 zu entnehmen. Die Einträge in der blauen Schriftfarbe kennzeichnen Stellen bei denen in den beiden Matrizen unterschiedliche Einschätzungen vorlagen.

Aus der Gegenüberstellung der beiden unabhängig voneinander erstellten Zuordnungen wurde deutlich, dass für den überwiegenden Teil an FEP eine gute Übereinstimmung gegeben war, aber für eine Reihe anderer FEP die Zuordnungen teilweise stark divergierten. Weitere unabhängige Zuordnungen würden die inhärente Subjektivität dieses Arbeitsschrittes zwar nicht eliminieren, jedoch könnte hierbei das Streuungsmaß der subjektiven Einschätzungen erkennbar und damit möglicherweise die Positionen bzw. Stellen in der Matrix offengelegt werden, bei denen gehäufte unterschiedliche fachliche Auffassungen und Einschätzungen hinsichtlich der Zuordnung vorliegen. In Kapitel 7 wird auf die subjektiven Einflüsse des Verfahrens zur Entwicklung von Szenarien gesondert eingegangen.

### 3.3 Sicherheitsfunktionen

Der Begriff Sicherheitsfunktion kommt ursprünglich aus dem Bereich der Reaktortechnik und ist im Glossar der IAEA /IAE 07/ wie folgt definiert:

„A specific purpose that must be accomplished for safety.“

Die im Rahmen der Entsorgung bzw. Endlagerung von radioaktiven Abfällen aufgestellten Definitionen von Sicherheitsfunktionen von verschiedenen Ländern weichen im Wortlaut und inhaltlich zum Teil deutlich voneinander ab. Jedoch stimmen die beziehenden Kernaussagen in den Definitionen gut überein. So werden die Sicherheitsfunktionen in fast allen Fällen auf Endlagerkomponenten bezogen, die eine sicherheitsgerichtete Aufgabe, Anforderung, Rolle usw. zu erfüllen haben.

Für den Begriff Sicherheitsfunktion wird in Anlehnung an die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen /GRS 07/ im Rahmen des Vorhabens VerSi folgende Definition verwendet:

„Eine Sicherheitsfunktion ist eine Funktion, die in einem sicherheitsbezogenen System, Teilsystem oder einer Einzelkomponente der Erfüllung definierter sicherheitsrelevanter Anforderungen dient und deren Wirkung einschätzbar ist. Die Wirkung der Sicherheitsfunktion kann auf einen bestimmten Zeitabschnitt des Nachweiszeitraums beschränkt sein. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Isolation als die primäre Sicherheitsfunktion in einem Endlagersystem gewährleistet.“

Die SF sind durch nachfolgende Merkmale gekennzeichnet:

- Die der SF zugrundeliegenden konzeptionellen Anforderung aus der die sicherheitsgerichtete Wirkung hervorgeht,
- den Wirkungszeitraum und
- die Komponente bzw. Komponenten, Teilsysteme oder Gesamtsystem, die die SF zu erfüllen haben.

Zur Prüfung der Wirksamkeit der SF werden in Sicherheitsanalysen eine Beurteilungsgröße (BG) und ein Bewertungsmaßstab (BM) zugrunde gelegt /SKB 06/. Die BG dient der Bewertung der Funktionsfähigkeit von Teilsystemen und Komponenten des Endla-

gersystems im Hinblick auf die gestellten Anforderungen. Der BM ist ein vorgegebener quantitativer Grenzwert, der bei Einhaltung der BG die Erfüllung der SF indiziert.

Im Zusammenhang mit SF werden in der Literatur allgemeine Aspekte genannt, die das Zusammenspiel zwischen Komponenten und SF sowie Wirkungszeiträume beschreiben. Solche allgemeinen Aspekte sind im Folgenden aufgeführt:

- Die Komponenten können eine oder mehrere SF ausüben,
- eine SF kann durch mehrere Komponenten ausgeführt werden,
- die SF weisen in bestimmten Zeiträumen ihre Wirksamkeit auf,
- das Zusammenwirken von Komponenten und Teilsystemen und ihren SF gewährleisten die Erfüllung der Sicherheit des Gesamtsystems,
- der Ausfall einer oder mehrerer SF führt nicht zwangsläufig zum Versagen des Gesamtsystems,
- mögliche Abhängigkeiten der SF untereinander
  - eine SF ist abhängig von einer anderen SF
  - mehrere SF stehen in wechselseitiger Abhängigkeit zueinander
- einige SF werden erst dann wirksam, wenn andere SF ihre Funktionswirkung verlieren.

Die SF werden in vielfältiger Weise benutzt bzw. herangezogen. So sind nachstehend einige Anwendungsbereiche von SF aufgeführt:

- Als Grundlage für die Planung und Ausgestaltung des Endlagersystems,
- als Ansatz zur Identifikation/ Ableitung von Szenarien, die im Sicherheitsnachweis zu betrachten sind,
- zur Veranschaulichung von komplexen Zusammenhängen,
- zur Identifizierung von F&E-Bedarf (insbes. in Bezug auf BM),
- für die Konstruktion von „What-If-Cases“ zur Darstellung der Robustheit des Systems,
- zur Identifizierung und Sammlung von zusätzlichen qualitativen Argumenten als Beitrag zum Langzeitsicherheitsnachweis (Safety Case) und

- als Mittel zur Kommunikation hinsichtlich der Sicherheitsbeurteilung und der Ausgestaltung des Endlagersystems bzw. den technischen Anforderungen.

Im Rahmen des vorliegenden Teilvorhabens 3607R02580 ist vor allem die Anwendung von SF unter dem Aspekt der Identifizierung bzw. Ableitung von Szenarien relevant. Ansätze hierzu sind z. B. von Schweden im SR-Can Vorhaben /SKB 06/ und Belgien im PAMINA Vorhaben /SCK 07/ beschrieben worden.

Die folgenden Unterkapitel (3.3.1 – 3.3.3) dokumentieren die Einteilung und den strukturellen Aufbau von SF, die Zusammenstellung der SF-Datengrundlage sowie die daraus erfolgte Festlegung von SF für die Funktionsanalyse als Grundlage zur Ableitung von Szenarien.

### **3.3.1 Einteilung/ Struktur der Sicherheitsfunktionen**

In vielen Ländern erfolgt eine strukturelle Einteilung von Sicherheitsfunktionen, die ausgehend von sog. Hauptsicherheitsfunktionen weitere Unterteilungen in Untersicherheitsfunktionen zulässt. Darin zählen zu den Hauptsicherheitsfunktionen:

- Isolation bzw. Einschluss,
- Retardation bzw. Rückhaltung und Begrenzung,
- Dispersion bzw. Verteilung und
- Dilution bzw. Verdünnung.

Die beiden letztgenannten Sicherheitsfunktionen Verteilung und Verdünnung werden im internationalen Rahmen kontrovers diskutiert. Hierbei wird insbesondere argumentiert, dass die geologische Umgebung des Endlagersystems bei der Einschätzung der Sicherheit des Endlagers einzubeziehen ist. Der Beitrag den die geologische Umgebung liefert, besteht hauptsächlich in der Verdünnung und Verteilung von möglicherweise freigesetzten Radionukliden. Im Vergleich zu den Sicherheitsfunktionen im Endlagerbereich kann die Rolle der Verdünnung und Verteilung nur von sekundärer Bedeutung sein, da jegliche Anstrengungen zu deren Optimierung zur Strategie des „Verdünnens und Verteilens“ führt, anstatt zur favorisierten Strategie des „Konzentrierens und Einschlusses“. Darüber hinaus ist es aufgrund der langen zu betrachtenden Zeiträume sehr schwierig, sich auf die Rolle der Verdünnung und Verteilung abzustützen, da sich die Verhältnisse in der geologischen Umgebung mit der Zeit beträchtlich än-

dern können. Aus den genannten Gründen erfolgt z. B. in Belgien eine Konzentration der definierten Sicherheitsfunktionen auf den Endlagerbereich selbst und nicht auf seine Umgebung /SCK 07/.

Verdünnung und Verteilung werden im Verbundvorhaben VerSi nicht als Sicherheitsfunktionen betrachtet. Dies widerspricht auch den Grundprinzipien der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen die auf das Konzept der Konzentration und Isolation abstellen. Der Fokus liegt daher auf den beiden SF der Isolation sowie der Retardation und Begrenzung. Der Begriff Isolation hat in den einzelnen fachlichen Disziplinen unterschiedliche Bedeutungen. Im Rahmen dieses Teilvorhabens orientiert sich der Isolationsbegriff an der folgenden Definition /GRS 07/:

„Isolation beschreibt im Allgemeinen einen Zustand, bei dem der Transport einer Substanz oder von Energie vermindert oder verhindert wird, d.h. den durch Isolierung / Abdichtung mittels isolierender Materialien (Isolatoren) erreichten Zustand (Vollkommene Isolatoren gibt es nicht). Isolation bedeutet bei der Endlagerung, die Freisetzung und den Transport von Schadstoffen so zu behindern, dass die Sicherheitsprinzipien und Schutzziele innerhalb des Nachweiszeitraumes eingehalten werden.“

Nach der Definition hat die Isolation eine rückhaltende Wirkung und wird demnach im Verbundvorhaben VerSi zusammen mit der Retardation und der Begrenzung unter der primären SF (R) „Radionuklidrückhaltung“ geführt. Die Rolle der primären SF (R) kann im Rahmen von VerSi wie folgt beschrieben werden:

Mit der Radionuklidrückhaltung sind die zeitlichen Verzögerungen der Freisetzung durch Transportprozesse von Radionukliden und/ oder Retentionsmechanismen verbunden. Die in der Radionuklidrückhaltung eingehende o. g. Begrenzung zielt auf die Verminderung bzw. Abschwächung der möglichen Radionuklidfreisetzung hinsichtlich der Konzentration, Aktivität, Mengen usw. ab. Eine steuernde Wirkung auf die Freisetzung der chemisch sehr unterschiedlichen Radionuklide haben eine Vielzahl von Prozessen wie z. B. Adsorption, Desorption, Ionenaustausch, Fällungs- und Lösungsreaktionen, Filtration, Komplexbildungen und Änderungen der Redoxreaktionen.

Neben der primären SF (R) wird eine weitere in ihrer Bedeutung gleichrangige primäre SF (S) mit der Bezeichnung „Schutz rückhaltender Sicherheitsfunktionen“ aufgestellt, die der integritätsbewahrenden SF im Vorhaben 3607R02589 entspricht. Die primäre

SF (S) ist dabei anforderungsspezifisch auf die Protektion gegen äußere und innere Einwirkungen ausgerichtet.

Im Prinzip sind weitere Unterteilungen der beiden primären SF denkbar. Hier bleibt es dem Entwickler zu entscheiden, ab welcher Unterteilungsebene noch ein praktikabler Nutzen gesehen wird und ab wann die Differenzierung von SF zu Lasten der Übersichtlichkeit gehen. Für die hier vorliegende Struktur scheint es im Sinne der Differenzierung und Übersichtlichkeit praktikabel zu sein mit der zweiten Unterteilungsebene abzuschließen unter dieser dann die SF für die entsprechende Systemkomponente formuliert wird. Eine weitere Unterscheidung lässt sich nach der Art der SF vornehmen /NEA 06b/:

- Reserve-SF (noch vorhandene Wirkung, möglicherweise jedoch in einer verminderten Form; Wirkungsdauer ist nicht oder nur schwer quantifizierbar).
- Begrenzte-SF (beinhalten ein höheres Leistungsvermögen als ihnen zugedacht wird, das jedoch nicht oder nur schwer quantifizierbar ist).
- Latente-SF (übernehmen dann ihre Aufgabe, wenn eine übergeordnete SF ausfällt).

In Abbildung 3.4 ist die in diesem Teilvorhaben vorgenommene Einteilung der Sicherheitsfunktionen in primären Sicherheitsfunktionen und deren Untergruppen schematisch dargestellt.

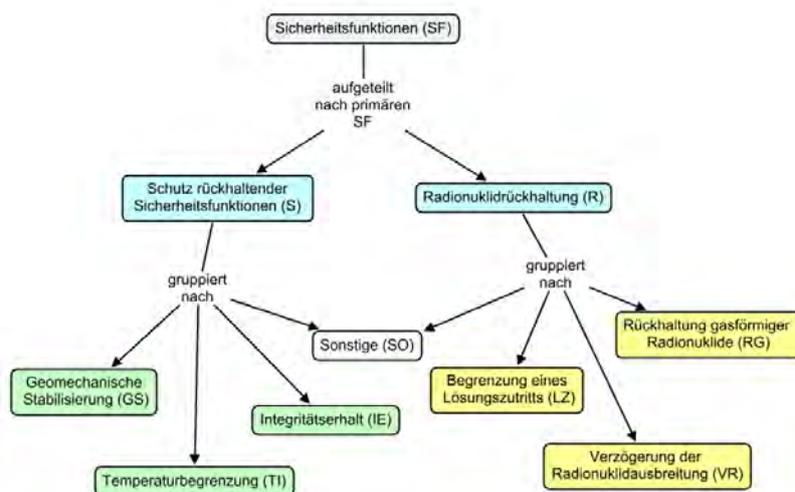


Abb. 3.4: Darstellung der Einteilungsstruktur von Sicherheitsfunktionen nach primären Sicherheitsfunktionen und deren Untergruppen

Die weitere Zielsetzung nach der in Kapitel 2 skizzierten methodischen Vorgehensweise ist die Bereitstellung von SF entlang der in Kapitel 3.1 aufgestellten Systemkomponenten. Dieser Zielsetzung wird in den nachstehenden Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 nachgegangen.

### **3.3.2 Datengrundlage an Sicherheitsfunktionen**

Analog der FEP-Datengrundlage (siehe Kapitel 3.2.2) wurde es in Bezug auf SF für wesentlich erachtet, sich einen Überblick aus vorhandenen Berichten und Dokumenten zu verschaffen. In einem ersten Schritt wurden daher aus der zugänglichen Fachliteratur die definierten bzw. aufgestellten SF, unabhängig vom jeweiligen zugrunde liegenden Endlagerkonzept und geologischer Formation, zusammengetragen und in strukturierter Form in einer Excel Tabelle abgelegt. Parallel dazu, wurde die Zusammenstellung mit bestimmten SF auf der Basis von GRS Einschätzungen erweitert (siehe Anhang 4). Die SF-Datengrundlage erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, da wie oben bereits beschrieben, mit der SF-Datengrundlage die Absicht verfolgt wurde, sich einen Überblick über SF aus verschiedenen Ländern und Organisationen zu verschaffen. Weiterhin war mit der Datengrundlage die Absicht verbunden Anregungen für eigene Aufstellungen und Einschätzungen von SF zu erhalten und ein Gefühl für den Umgang mit SF zu entwickeln. Im Folgenden sind die Quellen, aus der die SF entnommen wurden, und die Anzahl an SF sowie die bezugnehmende geologische Formation angegeben:

- ANDRA, Dossier 2005 Argile /AND 05/, 6 SF, Ton
- BGR /BGR 01/, 1 SF, Salz
- NAGRA, Projekt Opalinuston /NAG 02/, 3 SF, Ton
- Posiva, Beitrag im PAMINA Vorhaben /POS 07/, 22 SF, Granit
- SKB, SR-Can Bericht /SKB 06/, 15 SF, Granit
- GRS, Zwischenbericht Tonkonzept /GRS 08d/, Vortrag /BRA 08/ und Vorhabenbericht (Entwurfsstatus) /GRS 08e/ (Hinweis: nicht für alle SF kann eine Literaturquelle angegeben werden, da die SF aus Präsentationen und internen Arbeitsdokumenten entnommen wurden), 86 SF, Ton und Salz

Die o. g. Excel Tabelle enthält folgende Datenfelder:

- Kenn\_NR: Kennnummer für die einbezogene SF,
- SK\_NR: Hauptkennnummer der beziehenden SK zur SF,
- SK\_LFD\_NR: Laufende Nummerierung (bei mehreren SF, die sich auf die gleiche SK beziehen)
- Systemkomponente: Benennung der SK.
- Sicherheitsfunktion: Beschreibender Text zur entsprechenden SF.
- Beurteilungsgröße: Zur Beurteilung der Funktionsfähigkeit.
- Bewertungsmaßstab: Quantitativer Grenzwert, der bei Einhaltung der Beurteilungsgröße die Erfüllung der SF indiziert.
- Quelle: Bezugsquelle, aus der die Information zu der entsprechenden SF entnommen wurde.

Aus der Zusammenstellung (Anhang 4) ist zu ersehen, dass insgesamt 133 SF zusammengetragen wurden, die z. T. redundant vorliegen und sich in der Art der Beschreibung der SF erheblich unterscheiden. Die Festlegung von SF wird in Kapitel 3.3.2 behandelt.

Unter Einbeziehung der SF-Datengrundlage und in Abstimmung mit dem Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“ werden die für VerSi relevanten SF festgelegt. Es ist noch anzumerken, dass weder national noch international ein systematisiertes und/ oder Kriterien gesteuertes Ableitungsverfahren für SF vorliegt bzw. zur Anwendung gekommen ist. Vermutlich ist die Entwicklung und Umsetzung eines solchen Verfahrens entweder nicht oder nur stark eingeschränkt möglich. Die Festlegung bzw. Auswahl der SF erfolgt auf der Basis subjektiv getragener Einschätzungen zum jeweiligen Endlagerkonzept. Die Vorgehensweise in dem Teilvorhaben 3607R02580 ist dahingehend vergleichbar. Jedoch ist es für die im VerSi vorgegebene Zielsetzung essentiell Subjektivitäten bei einer Festlegung, Einschätzung usw. zu erkennen und zu dokumentieren (siehe hierzu Kapitel 3.2.4 und 7).

Die festzulegenden SF sollen vor allem eine Anpassung im Sinne einer einheitlichen Beschreibung der SF erfahren. Weiterhin soll die SF-Datengrundlage dahingehend gesichtet werden, ob die einzelnen aufgestellten Systemkomponenten (siehe Kapitel

3.1) sich in der Datengrundlage wieder finden. Bei nicht aufgeführten Systemkomponenten und damit verbundenen SF gilt zu prüfen, ob die Erfordernis besteht, eine SF mit Bezug zur entsprechenden bisher nicht berücksichtigten Systemkomponente aufzunehmen.

### **3.3.3 Festlegung von relevanten Sicherheitsfunktionen**

Die Festlegung von SF aus der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen SF-Datengrundlage wird vorgenommen, um somit ein weiteres Hauptelement für die durchzuführende Funktionsanalyse (siehe Kapitel 5) zu generieren.

In einem ersten Schritt wurden vorliegende redundante SF zu einer SF zusammengefasst um somit mögliche Kandidaten für die Festlegung von SF einzuengen. Der zweite Schritt beinhaltete eine Aufteilung der eingeeengten SF-Datengrundlage nach den primären Sicherheitsfunktionen SF (R) „Radionuklidrückhaltung“ und SF (S) „Schutz rückhaltender Sicherheitsfunktionen“.

Der nächste Schritt war auf die Auswahl von SF nach Systemkomponenten ausgerichtet. Abschließend wurde in der Fachdiskussion die Festlegung der Sicherheitsfunktionen vorgenommen.

Die im Rahmen des genannten Ablaufes festgelegten Sicherheitsfunktionen sind dem Anhang 5 zu entnehmen. Insgesamt wurden 50 SF festgelegt, wobei auf eine SK im Durchschnitt 4 bis 5 Sicherheitsfunktionen entfielen. Aus den festgelegten SF wurde deutlich, dass die mit der SF verbundenen Aufgabe, die durch die SK zu erfüllen ist, in vielen Fällen in die gleiche Richtung geht, wodurch eine Gruppierung der SF ermöglicht wird. Beispiele hierfür sind: „Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ die von einer Reihe von Systemkomponenten wie Versatz, Wirtsgestein, Schachtverschluss etc. wahrzunehmen sind oder „Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen“ bezogen auf die Systemkomponenten ewG, geologische Umgebung und Wirtsgestein. Die Abbildung 3.5 zeigt die gruppierten Sicherheitsfunktionen (SF\_ZUS\_NR und Beschreibung der SF), die Art der SF (Schutz oder Rückhaltung) sowie die Systemkomponenten (mit x gekennzeichnet), die der SF zu entsprechen haben.

Darüber hinaus lässt die Abbildung 3.5 erkennen, welche Sicherheitsfunktionen auf eine Systemkomponente vereint sind (z. B. SF\_ZUS\_NR: 7, 14, 9, 2, 1, 16, 19, 10 auf die Systemkomponente Versatz (VE)).

Es ist darauf hinzuweisen, dass an dieser Stelle noch keine Differenzierung der SF hinsichtlich des Endlagersystems bzw. Wirtsgesteins erfolgt ist. Im Rahmen der Funktionsanalyse wird eine dahingehende Unterscheidung vorzunehmen sein. Jedoch ist bereits aus der allgemeinen Aufstellung ersichtlich, dass die SF bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. auf die Sorption ausgerichtete SF, auf beide Systeme anwendbar sind.

In Kapitel 3.3.2 wurde bereits darauf eingegangen, dass die Auswahl bzw. Festlegung von SF aufgrund subjektiver Entscheidungen erfolgt. Auch hier ist es analog zu den FEP (siehe Kapitel 3.3.3) für eine spätere Anwendung zu empfehlen, mehrere voneinander unabhängige Festlegungen an SF durchzuführen, um mögliche Häufungspunkte von unterschiedlichen Auffassungen und Einschätzungen zu erkennen und zu dokumentieren. Eine Eliminierung von subjektiven Einflüssen ist damit jedoch nicht verbunden. Gleichwohl kann durch die Festlegung von SF auf der Basis mehrerer unabhängiger adäquater Einschätzungen das Vertrauen in die Auswahl und in den Entscheidungsprozess erhöht werden (siehe hierzu auch Kapitel 7).

SF_ZUS_NR	Beschreibung der SF	Schutz (S) /Rückhaltung (R)	GS											
			AP			AG		ELB		EB		EL	ES	
			A	FM	AB	VE	BE	WB	SV	EWG	WG	GU		
20	Verzögerung der Radionuklidenausbreitung durch Lösungsbeständigkeit der Hüllrohre und der Brennstofftablett	R	x											
21	Verzögerung der Radionuklidenausbreitung durch Beständigkeit der Glasmatrix gegenüber zutretender Lösung (Glaskorrosion)	R		x										
7	Geomechanische Stabilisierung: Schutz vor geomechanischen Einflüssen von Außen	S			x	x								
14	Temperaturbegrenzung/Integritätsershalt: Ableitung der Zerfallswärme	S			x	x								
11	Begrenzung der Gasbildung: Begrenzung der Gasbildungsrate (Korrosion) und Gasmenge	S			x									
9	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	R			x	x	x	x	x	x	x	x		
2	Geomechanische Stabilisierung: Lagefixierung des Abfallgebindes	S				x								
1	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins	S				x	x	x	x					
16	Verzögerung der Radionuklidenausbreitung durch Löslichkeitsbegrenzung	R				x								
19	Verzögerung der Radionuklidenausbreitung durch Sorption	R			x	x	x	x	x	x	x	x	x	
10	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	R				x	x	x	x	x	x	x		
3	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke, ggf. des Bentonitquelldrucks des Versatzes (Tonsteinkonzept))	S					x		x	x				
6	Geomechanische Stabilisierung: Schutz der Hangenden Schichten vor der Bildung von sekundären Wegsamkeiten	S						x						
4	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	S								x	x	x		
5	Geomechanische Stabilisierung: Mechanischer Schutz der technischen Abdichtungen	S								x				
15	Temperaturbegrenzung/Integritätsershalt: Schadloose Aufnahme der Zerfallswärme	S								x				
8	Integritätsershalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion	S										x	x	
12	Begrenzung des Radionuklidtransports durch geringe Permeabilität	R												x
17	Verzögerung der Radionuklidenausbreitung durch Ausbildung einer mineralisationsbedingten Dichteschichtung	R												x
13	Verdünnung von Radionuklidkonzentrationen durch Zumischung von nichtkontaminierten Grundwässern	R												x
18	Verzögerung der Radionuklidenausbreitung durch Kolloidfiltration	R												x

Abb. 3.5: Auflistung der gruppierten Sicherheitsfunktionen mit Angabe der Identifikationsnummer (SF\_ZUS\_NR), der Benennung der SF (Beschreibung der SF) und der Art der SF (Schutz (S)/ Rückhaltung (R)) und die Systemkomponenten (A, FM, ...; WG, GU) mit Angabe der Teilsysteme (AP, AG, etc), die die SF wahrnehmen (mit x gekennzeichnet).

## **4 Erwartete Entwicklung für die Endlagersysteme**

Als Basis für die Identifizierung von Szenarien ist es essentiell, das Endlagersystem, das den Standort und das Endlager mit seinen Komponenten und dem darin eingelagerten radioaktivem Abfall umfasst, hinsichtlich seiner Entwicklung zu beschreiben. Hintergrund dabei ist, ein Verständnis dafür zu erlangen, inwieweit das Endlagersystem unter Einbeziehung von erwarteten Abläufen bzw. Prozessen bestimmten Veränderungen unterlegen ist.

Die erwartete Entwicklung spiegelt die Erwartungshaltung hinsichtlich der Evolution des Endlagersystems wider. Mit der Beschreibung der erwarteten Entwicklung ist eine subjektive Komponente hinsichtlich der Einschätzung der Entwicklung verbunden. D. h., dass die Beschreibung der erwarteten Entwicklung betrachtungsspezifisch ist und je nach individuellen Sichtweisen variieren kann. Insbesondere dann, wenn sich hinsichtlich eines Entwicklungspfades mögliche Verzweigungen abzeichnen.

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass die erwartete Entwicklung nicht zwingend mit einem definierten Referenzszenario oder Bezugsszenario als Ausgangssituation für die Langzeitsicherheitsanalysen übereinstimmen muss. Abweichungen von nicht erwartungsgemäßen Entwicklungen wie z. B. konstante Randbedingungen erfolgen meist aus modelltechnischen Überlegungen, die den zeitlichen Aufwand der Analysen im praktischen Rahmen halten. Derartige Überlegungen stellen keinen Widerspruch zur Beschreibung der erwarteten Entwicklung dar.

In diesem Vorhaben erfolgt aufsetzend auf die Beschreibung der erwarteten Systementwicklung unter Einbindung der methodischen Vorgehensweise (Kapitel 2) die Ableitung von weiteren möglichen wahrscheinlichen oder auch weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems (Kapitel 6).

In den folgenden Unterkapiteln wird die erwartete Entwicklung zu den beiden Standorten in Salz und Ton skizzenhaft beschrieben. Die Darstellung der erwarteten Entwicklung beinhaltet die zeitlichen Eckpunkte für einsetzende und abgeschlossene Prozesse bzw. Abläufe ohne auf die eigentlichen Mechanismen im Detail einzugehen. Eine detaillierte Beschreibung in tabellarischer Form entlang der Systemkomponenten und Zeitphasen enthält Anhang 6 für Salz und Anhang 7 für Ton. Beide Beschreibungen können als Beispiel für diesen methodischen Ansatz nicht alle FEPs und Zusammenhänge vollständig abdecken.

Die nachfolgende Beschreibung berücksichtigt standortspezifische und konzeptspezifische Gegebenheiten sowie Vorgaben und unumgängliche Annahmen. Darüber hinaus erfolgt die Darstellung entlang folgender festgelegter Zeitphasen:

- Phase 1: von 0 bis 10.000 Jahren
- Phase 2: von 10.000 bis 50.000 Jahren
- Phase 3: von 50.000 bis 150.000 Jahren
- Phase 4: von 150.000 bis 1.000.000 Jahren

Die genannten Zeitphasen orientieren sich im Wesentlichen an dem Zeitpunkt des Endlagerverschlusses und der stattfindenden Nahfeldprozesse der Übergangsphase (Phase 1), weitgehend stationäre Nahfeldbedingungen (Phase 2), eiszeitliche Periode (Phase 3) und weitere Kaltzeiten sowie natürliche Prozesse bis zum Ende des Nachweiszeitraums (Phase 4). Desweiteren erleichtert die Beschreibung der erwarteten Entwicklung nach Zeitphasen die Einordnung bzw. Diskussion der Sicherheitsfunktionen unter Einbeziehung ihrer zugeordneten Wirkungszeiträume bei der Funktionsanalyse.

Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass die in den Klammern enthaltenen Kennzeichnungen wie z. B. 3\_4\_1 sich auf entsprechende FEP (Anhang 1) beziehen. Angaben mit einem x wie z. B. 1\_5\_x weisen darauf hin, dass alle FEP unter der Kennung 1\_5 (1\_5\_1, 1\_5\_2, ..., 1\_5\_10) angesprochen sind.

#### **4.1 Steinsalzstandort**

##### **Annahmen**

Die Annahmen für den Standort und die technischen Barrieren, die bei der Planung und Errichtung des Endlagers im Steinsalz nach /GRS 09/ gemacht werden, sind beispielsweise:

1. Wegsamkeiten im Wirtsgestein für einen Lösungszutritt von außen in das Endlager werden ausgeschlossen. Dies ist durch eine entsprechende Erkundung und Auswahl des Standorts sichergestellt.

2. Ebenso wird durch eine entsprechende Erkundung sichergestellt, dass sich keine Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein in unmittelbarer Umgebung der Einlagerungsbereiche befinden, bzw. bei der Auffahrung der Grubenbaue angetroffen werden.
3. Alle Verschlussbauwerke werden entsprechend ihrer Spezifikation errichtet.
4. Der Versatz aus Salzgrus im Endlagerbergwerk wird mit der Zeit so weit kompaktiert, dass dessen Permeabilität so gering wird, um einen Lösungszutritt durch die aufgefahrenen und versetzten Grubenbaue zu den Abfällen über eine Million Jahre zu verhindern.
5. Die aus der Salzformation zutretenden, sowie die mit dem Versatz eingebrachten Lösungsmengen sind jeweils so gering, dass die dadurch stattfindende Korrosion keine Beeinträchtigung der Integrität der Abfallbehälter erfolgt. Die Pollux-Behälter haben Wandstärken, die dem Gebirgsdruck durch das Salzgestein standhalten. Die Pollux-Behälter bleiben somit vollständig intakt. Die CSD-C und CSD-V-Behälter halten dem Gebirgsdruck durch das Salzgestein auf Grund deren geringerer Wandstärke nicht stand und fallen aus, sobald das Salzgestein durch die Konvergenz auf die Abfallbehälter aufgelaufen ist und der volle Gebirgsdruck auf den Behältern lastet.
6. Die Subrosion der Salzformation an der Salzstockoberkante erfolgt mit einer so geringen Rate, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht beeinträchtigt wird.
7. Im Endlager gebildete Gase können beim Erreichen des lokalen lithostatischen Drucks in das Wirtsgestein eindringen, ohne dass dabei die Durchlässigkeit bzw. die Barrierenfunktion der Wirtsfornation gegenüber Lösungen beeinträchtigt wird.

Ergänzend wird vorausgesetzt, dass nur die vorgesehenen Abfälle entsprechend ihrer Spezifikation (Polluxbehälter, CSD-V, CSD-C,...) eingelagert werden.

### **Phase 0 bis 10.000 Jahre**

Die Phase beginnt ab dem Verschluss des Endlagers, d. h. nachdem der Einlagerungsbetrieb bestimmungsgemäß durchgeführt und das Endlager planungsgemäß versetzt und verschlossen wurde.

Der Einlagerungsbereich des Endlagers ist bereits durch die Zerfallswärme der eingelagerten Abfälle aufgeheizt. Es findet weiterhin eine andauernde aber abnehmende Wärmeproduktion (3\_4\_1) durch den radioaktiven Zerfall (3\_4\_3) statt. Die Temperaturerhöhung (2\_1\_7, 3\_4\_7) begünstigt die Kompaktion des Versatzes (2\_2\_2) und die Konvergenz des Wirtsgesteins (1\_2\_1).

Chemische Umwandlungen des Abfalls, des Fixierungsmittels bzw. des Abfallprodukts finden statt (1\_8\_1). Die Umsatzraten aufgrund Radiolyse (3\_4\_4) und einer geringen Restfeuchte sind klein. Die Korrosion von Metallen (2\_1\_11, 3\_2\_5) unter Gasbildung (3\_2\_3) ist aufgrund der begrenzten Restfeuchte im Abfall, Versatz und Gestein gering. Gebildete Gase werden durch Diffusion oder durch Migration auf Korngrenzen weitertransportiert (3\_2\_10), so dass ein Gasdruck den Gebirgsdruck nicht übersteigt.

Die Behälter sind bis zur Einlagerung mechanisch stabil und dicht, da dies durch eine Überwachung gewährleistet wird. Das Auflaufen des Gebirgsdrucks auf die Behälter führt zu einem konvergenz- und damit zeitabhängigen Ausfall der mechanischen Integrität von CSD-C- und CSD-V-Behältern (2\_1\_1, 2\_1\_2). Einige Polluxbehälter werden trotz mechanischer Stabilität nach der Einlagerung undicht sein.

Der auflaufende Gebirgsdruck aufgrund der Konvergenz kompaktiert den Streckenversatz (2\_2\_2). Durch die Kompaktion werden die Porosität und Permeabilität des Versatzes verringert, dass eine Dichtwirkung gegenüber Fluiden erreicht wird.

Die abdichtende Wirkung der Schacht- oder Streckenverschlüsse gegenüber Fluiden ist unterschiedlich und lässt im Laufe der Zeit nach (2\_1\_5). Trotz der nachlassenden oder unterschiedlichen Wirksamkeit einzelner Strecken- oder Schachtverschlüsse bleibt die Gesamtwirkung der Abdichtung erhalten.

Externe natürliche Phänomene haben in dieser Zeitphase keinen Einfluss auf das Endlagersystem. Vulkanismus und Erdbeben sind durch die Standortauswahl ausgeschlossen (1\_2\_16). Die Halokinese ist gering (1\_2\_3). Subrosion ist ohne Bedeutung (1\_4\_5). Die klimatischen Bedingungen einer Warmzeit liegen vor (1\_3\_9).

Radionuklide werden nicht in Lösung aus den Abfallbehältern mobilisiert (1\_7\_9, 2\_1\_11), da keine Lösungen von außen durch die Abdichtungen in die Abfälle eindringen.

Die Diffusion von Radionukliden ist auf den Nahbereich der Abfallbehälter begrenzt (1\_6\_2).

### **Phase 10.000 bis 50.000 Jahre**

Der vollständige Ausfall der mechanischen Integrität der CSD-Behälter erfolgt. Weitere Pollux-Behälter werden undicht während die mechanische Stabilität erhalten bleibt. Die Wärmeproduktion durch den radioaktiven Zerfall ist abgeklungen (3\_4\_1) und der ortsübliche geothermische Tiefengradient ist wieder hergestellt.

Die temperaturbedingten Veränderungen des Abfalls und der Fixierungsmittel sind abgeschlossen (3\_4\_1). Strahlungsbedingte Veränderungen halten weiter an (3\_4\_8).

Die gebirgsmechanischen Vorgänge durch die Konvergenz (3\_3\_3) und die Verheilung der Auflockerungszonen (3\_3\_6) sind praktisch abgeschlossen. Der Ausfall der Schacht- und Streckenverschlüsse (2\_1\_4, 2\_1\_5) durch die nachlassende Dichtwirkung gegenüber Fluiden werden von den Eigenschaften des kompaktierten Versatz (2\_2\_2) und des Wirtsgesteins übernommen.

Die gegenwärtige Zwischeneiszeit bzw. die klimatischen Bedingungen einer Warmzeit halten weiterhin an (1\_3\_9).

Die Halokinese ist gering (1\_2\_3). Die Subrosion ist ohne Bedeutung (1\_4\_5).

Da keine Lösungen von außen durch die Abdichtungen die Abfälle erreichen, findet keine Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfallbehältern statt (1\_7\_9, 2\_1\_11).

Die Diffusion von Radionukliden ist auf einen Nahbereich um die Abfallbehälter begrenzt (1\_6\_2).

### **Phase 50.000 bis 150.000 Jahre**

Die natürliche Temperaturverteilung (geothermischer Gradient) ist nicht mehr von der Wärmeproduktion durch den radioaktiven Zerfall beeinflusst (3\_4\_1, 3\_4\_3).

Strahlungsbedingte Veränderungen im Abfall, Fixierungsmittel oder Abfallbehälter halten weiter an (3\_4\_4, 3\_4\_8). Der Transport von Radionukliden wird von der Diffusion

dominiert, da ohne Lösungszutritt Umwandlungsprozesse nur mit sehr geringen Raten ablaufen (1\_6\_2, 1\_6\_5).

Aufgrund des Klimaverlaufs der vergangenen 1.000.000 Jahre ist in dieser Phase eine Kaltzeit zu erwarten (1\_3\_4).

Die anfängliche Zwischeneiszeit dauert ca. 20.000 – 50.000 Jahre. Die Erosion verändert Geomorphologie und die Grundwasserströmungen (1\_5\_x). Der Übergang zur Eiszeit kann weitere 50.000 Jahre dauern. Veränderungen der Geomorphologie mit bedeutender Umverteilung von Fest- und Lockergestein und abnehmenden Grundwasserhaushalt treten ein (1\_4\_x). Die eigentliche Eiszeit dauert 10.000 bis 50.000 Jahre. Der Standort erfährt dauerhaften Permafrost und kann mit Eis von mehreren 100 m Mächtigkeit überdeckt werden (1\_3\_5). Die Spannungsänderungen im Gebirge erreichen das Endlager nicht (2\_1\_6).

Der Übergang von der Eiszeit zur nachfolgenden Zwischeneiszeit erfolgt in wenigen Jahrtausenden. Die Eisbedeckung und Gletscher schmelzen ab. Große und nachhaltige Veränderungen der Geomorphologie, rasch ändernde Grundwasserverhältnisse und topographische Verhältnisse sind damit verbunden. Zahlreiche Seen bilden sich, eine große Umverteilung von Fest- und Lockermaterial und Wasserwegsamkeiten verändern sich durch Erosion und Sedimentation weiter (1\_4\_x). Vorhandene Sedimente sind abgetragen und durch neu gebildete Sedimente ersetzt (1\_4\_4). Die Bildung von Rinnensystemen aufgrund der Erosionsleistung von Schmelzwässern ist möglich (1\_4\_1). Die Rinnensysteme erreichen wegen der Mächtigkeit der Überdeckung das Endlager bzw. den einschlußwirksamen Gebirgsbereich nicht.

Die Grundwasserströmungen sind grundlegend verändert (1\_5\_5). Die Subrosion kann zunehmen (1\_4\_5). Tektonische Prozesse bleiben vernachlässigbar. Der Temperaturgradient im Deckgebirge ist geändert, die Auswirkungen sind für das Endlager in einer Tiefe von 800 m allerdings unbedeutend (2\_1\_7).

Je nach Typ der Eiszeit (z. B. Weichsel, Elster, Saale) treten Veränderungen der hydraulischen Durchlässigkeit der über dem Salzstock verbliebenen Sedimentschichten auf (1\_2\_16).

Die rückhaltende bzw. abdichtende Wirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereich in Verbindung mit den Versatzeigenschaften und dem Wirtsgestein für Radionuklide bleibt erhalten.

Da keine Lösung von außen an die Abfälle zutritt (1\_6\_1), werden die Radionuklide nicht in Lösung mobilisiert (3\_4\_9). Die Diffusion von Radionukliden (1\_6\_2, 1\_6\_5s) ist auf einen Nahbereich um die Abfallbehälter begrenzt.

Eine zweite Kaltzeit mit Permafrost bis hin zur vollständigen Eisüberdeckung beginnt erst nach 150.000 Jahren (1\_3\_4, 1\_3\_9)..

### **Phase 150.000 bis 1.000.000 Jahre**

Strahlungsbedingte Veränderungen im Abfall, Fixierungsmittel oder Abfallbehälter halten weiter an (3\_4\_x). Der Transport von Radionukliden bleibt von der Diffusion dominiert (1\_6\_2, 1\_6\_5), da ohne Lösungszutritt die internen Umwandlungsprozesse nur mit sehr geringen Raten ablaufen.

Aufgrund des Klimaverlaufs der vergangenen 1.000.000 Jahre sind in dieser Phase mehrere Kaltzeiten zu erwarten (1\_3\_4). Die zeitliche Abfolge, Art und Dauer der Kaltzeiten ist nicht vorhersagbar. Die Intensität einer Eiszeit kann von dauerhaften Permafrost bis hin zu vollständigen Eisüberdeckungen von mehreren hundert Metern reichen. Die Grundwasserströmungsverhältnisse im Deckgebirge werden mehrfach grundlegend verändert (1\_3\_8).

Die Eisüberfahrungen ändern die Morphologie des Geländes mehrfach (1\_5\_1). Es werden vorhandene Sedimente abgetragen, aber auch neue Sedimente gebildet (1\_4\_4). Je nach Typ der Eiszeit (z. B. Weichsel, Elster, Saale) treten Änderungen der hydraulischen Durchlässigkeit der über dem Salzstock befindlichen Sedimentschichten auf (1\_5\_3). Die Bildung von Rinnensystemen aufgrund der Erosionsleistung von Schmelzwässern ist möglich (1\_5\_3), erreichen aber nicht die Tiefe des Endlagers. Die Subrosion kann zunehmen (1\_4\_5, 1\_5\_8). Die vorübergehend leicht erhöhte Halokinese (1\_2\_3) durch die Eisauflast im Zusammenhang mit Kaltzeiten ist im Vergleich zur bereits stattgefundenen Halokinese des Salzstocks in den zurückliegenden geologischen Zeiträumen gering und ohne Auswirkungen.

Die rückhaltende und abdichtende Wirkung des einschlußwirksamen Gebirgsbereich für Radionuklide bleibt in Verbindung mit den Versatzeigenschaften und dem Wirtsgestein erhalten.

### **Zusammenfassung Steinsalzstandort**

Der Einschluß der Radionuklide bleibt in der erwarteten Entwicklung wirksam. Es bilden sich keine Wegsamkeiten über die Begrenzung des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs aus. Die Standorterkundung hat sichergestellt, dass keine makroskopischen Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein vorliegen bzw. nach der Auffahrung der Grubenbaue entleert sind. Die Gebirgskonvergenz verringert den Porenraum des Versatzes und die EDZ mit der Zeit und reduziert so potenzielle Wegsamkeiten. Lösungsbedingte Veränderungen der Abfälle, Abfallbehälter oder Verschlüsse, die zu einer Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager im Wirtsgestein Steinsalz führen, treten in der erwarteten Entwicklung nicht über den einschlußwirksamen Gebirgsbereich hinaus auf.

## **4.2 Tonsteinstandort**

### **Annahmen**

Die Annahmen an den Standort und die technischen Barrieren, die bei der Planung und Errichtung des Endlagers in Tonstein nach /COL 09b/ und /GRS 09b/ gemacht werden, sind beispielsweise:

1. Es werden nur die vorgesehenen Abfälle entsprechend ihrer Spezifikation (Polluxbehälter, CSD-C,...) eingelagert.
2. Die geforderten Eigenschaften des ewG hinsichtlich der Permeabilität und der Diffusivität sind nachgewiesen.
3. Die Schacht – und Streckenverschlüsse haben den geforderten hydraulischen Widerstand und sind vergleichbar mit den Eigenschaften des Wirtsgesteins. Alle Verschlussbauwerke verhalten sich entsprechend ihrer Spezifikation.
4. Die Aufsättigung des Endlagerbergwerks erfolgt durch Lösungszuflüsse aus dem intakten Wirtsgestein und bevorzugt in den BE/HAW-Einlagerungsbereichen aufgrund eines Gradienten.

5. Die Wärmeableitung erfolgt unter Einhaltung des Temperaturkriteriums.
6. Die BE- und HAW-Abfallbehälter sind für mindestens 1.000 Jahre hydraulisch dicht. Die Korrosion verursacht keine Beeinträchtigung der Integrität der Abfallbehälter. Die Pollux-Behälter haben außerdem ausreichende Wandstärken um dem auflaufenden Gebirgsdruck standzuhalten. Die Behälter bleiben somit für diesen Zeitraum vollständig intakt.
7. Im Endlager gebildete Gase können beim Erreichen des lokalen lithostatischen Drucks in das Wirtsgestein eindringen, ohne dass dabei die Durchlässigkeit bzw. die Barrierenfunktion der Wirtsformation gegenüber Lösungen beeinträchtigt wird.

Ergänzend wird vorausgesetzt, dass nur die vorgesehenen Abfälle entsprechend ihrer Spezifikation (Behälter, CSD-V, CSD-C,...) eingelagert werden.

### **Phase 0 bis 10.000 Jahre**

Die Phase beginnt ab dem Verschluss des Endlagers, d. h. nachdem der Einlagerungsbetrieb bestimmungsgemäß durchgeführt und das Endlager planungsgemäß versetzt und verschlossen wurde.

Der Einlagerungsbereich des Endlagers ist bereits durch die Zerfallswärme der eingelagerten Abfälle aufgeheizt. Es findet eine andauernde aber abnehmende Wärmeproduktion (3\_4\_1) durch den radioaktiven Zerfall (3\_4\_3) statt. Trotz der Temperaturerhöhung bleiben die geforderten Eigenschaften des Bentonits erhalten (3\_4\_7, 2\_1\_7). Der Bentonitversatz wird durch das Porenwasser des umgebenden Gesteins aufgesättigt und quillt (2\_3\_8).

Die Gebirgskonvergenz (1\_2\_1) kompaktiert den Bentonitversatz (2\_2\_2).

Chemische Umwandlungen des Abfalls, des Fixierungsmittels bzw. des Abfallprodukts finden statt (1\_8\_1). Die Umsatzraten aufgrund Radiolyse (3\_4\_4) und einer geringen Restfeuchte sind klein. Nach einer kurzen oxidativen Korrosion an den Abfallbehältern aus Metall (2\_1\_11, 3\_2\_5) findet nur noch eine langsame anaerobe Korrosion unter Wasserstoffbildung (3\_2\_3) statt. Die Korrosion begünstigt reduzierende Bedingungen (3\_2\_7) und die spätere Sorption von Radionukliden (1\_7\_6) an den Korrosionsprodukten.

Die Abfallbehälter sind bis zur Einlagerung mechanisch stabil und dicht, da dies durch eine Überwachung gewährleistet wird. Über Undichtigkeiten von einzelnen Abfallbehältern (2\_1\_1, 2\_1\_2, 2\_1\_3) wird ein sofort mobilisierbarer Anteil der Radionuklide freigesetzt (3\_4\_9). Die verbleibenden Radionuklide in den Abfallbehältern, die als Aktivierungsprodukte in Brennelementhülsen oder als Spalt- und Zerfallsprodukte in der Brennelementmatrix oder verglasten Abfällen eingebunden sind, werden mit geringer Rate aus diesen Abfallbehältern freigesetzt (3\_4\_9). Löslichkeitsgrenzen begünstigen die Ausfällung von Radionukliden (1\_7\_5).

Die Radionuklide werden durch Sorption im Bentonitversatz zurückgehalten (1\_7\_6). Die Kolloidfiltration ist wirksam (1\_7\_8). Der Transport der Radionuklide ist diffusionsdominiert (1\_6\_5).

Die Korrosion findet unter Gasbildung statt (3\_2\_5, 3\_2\_3). Der Gasfluss erfolgt entlang der Auflockerungszonen und verteilt sich in das Wirtsgestein (3\_2\_10). Der Gastransport erfolgt durch Diffusion, 2-Phasen-Fluss bis hin zur reversiblen, dilatanten Bildung von Wegsamkeiten (1\_6\_1 - 1\_6\_6).

Das Auflaufen des Gebirgsdruck auf die Verschlüsse und das Quellen des Bentonits aufgrund der Aufsättigung beansprucht diese mechanisch neben der Zerfallswärme und dem Gasfluss. Dies erhöht die Durchlässigkeit einiger Verschlüsse (2\_1\_4, 2\_1\_5). Die Strecken- und Schachtverschlüsse behalten ihre hydraulischen Eigenschaften als Ganzes.

Es werden keine hydraulisch aktiven Störungen geotektonisch aktiviert (1\_2\_4). Vulkanismus und Erdbeben sind aufgrund der Standortauswahl ausgeschlossen (1\_2\_16). Eine geringe Subsidenz des Wirtsgesteins findet statt (1\_2\_12). Die Änderung der Geomorphologie durch Erosion beeinflusst nicht das Wirtsgestein und den ewG (1\_4\_3, 1\_5\_1).

Die gegenwärtige Zwischeneiszeit bzw. die klimatischen Bedingungen einer Warmzeit halten weiterhin an (1\_3\_9).

Radionuklide werden teilweise in Lösung in den Abfallbehältern mobilisiert (1\_7\_9, 2\_1\_11), da Lösungen von außen bis in die Kokillen eindringen.

Die Diffusion von Radionukliden ist auf den Nahbereich der Abfallbehälter begrenzt (1\_6\_2).

### **Phase 10.000 bis 50.000 Jahre**

Die Wärmeproduktion durch den radioaktiven Zerfall ist abgeklungen (3\_4\_1, 3\_4\_3) und der ortsübliche geothermische Tiefengradient ist wieder hergestellt.

Der Bentonitversatz ist gesättigt (2\_3\_8) und dessen Kompaktion ist abgeschlossen (3\_2\_2).

Die gebirgsmechanischen Vorgänge sind abgeschlossen.

Der vollständige Ausfall der Behälter ist erfolgt (2\_1\_2). Das Versagen eines Abfallbehälters setzt einen sofort mobilisierbaren Anteil gasförmiger Radionuklide aus dem Abfallbehälter frei (3\_4\_9). Die übrigen Radionuklide, die als Aktivierungsprodukte in Brennelementhülsen oder als Spalt- und Zerfallsprodukte in der Brennelementmatrix oder verglasten Abfällen enthalten sind, werden mit geringer Rate durch Korrosion oder Diffusion aus diesen Abfallbehältern freigesetzt.

Aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit der Brennelementhülsen werden die eingeschlossenen Aktivierungsprodukte über mehrere 10.000 Jahre freigesetzt (3\_2\_5). Auch die Brennelementmatrix wird aufgrund reduzierender Bedingungen durch Korrosion nur langsam aufgelöst (2\_1\_11). Die verglasten Abfälle lösen sich ebenfalls mit geringer Rate auf (2\_1\_11). Löslichkeitsgrenzen begünstigen die Ausfällung von Radionukliden (1\_7\_5, 3\_2\_13).

Die Aufsättigung des Bentonits hat eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit zur Folge (1\_6\_6). Der Transport von Radionukliden im Bentonit findet über Diffusion (1\_6\_5) statt und wird durch Sorption (1\_7\_6) verlangsamt. Kolloide werden im Bentonit zurückgehalten (1\_7\_8).

Der Ausfall der Schacht- und Streckenverschlüsse (2\_1\_4, 2\_1\_5) durch die nachlassende Dichtwirkung gegenüber Fluiden werden von den Eigenschaften des kompaktierten Versatz und des Wirtsgesteins übernommen.

Gasbildung findet weiter statt (3\_2\_10). Ein Gasfluss findet entlang der Auflockerungszonen und in das Wirtsgestein statt (3\_2\_10). Der Gastransport erfolgt durch Diffusion, 2-Phasen-Fluss bis zur dilatanten Bildung von Wegsamkeiten.

Nach der Wiederaufsättigung des Endlagers ist ein neues hydrogeologisches Gleichgewicht ausgebildet (1\_5\_6). Auflockerungszonen sind verheilt (2\_1\_10).

Es sind keine hydraulisch aktiven Störungen vorhanden oder geotektonisch aktiviert (1\_2\_6).

Die Diffusion und die Sorption bestimmen den weiträumigen Transport von Radionukliden im Tonstein des ewG (1\_6\_5). Ein Kolloidtransport wird ausgeschlossen (1\_7\_8).

Vulkanismus und Erdbeben sind aufgrund der Standortwahl ausgeschlossen (1\_2\_16). Eine geringe Subsidenz des Wirtsgesteins findet statt (1\_2\_12). Die Änderung der Geomorphologie durch Erosion ist gering und beeinflusst nicht den ewG im Wirtsgestein (1\_4\_3).

Die klimatischen Bedingungen einer Warmzeit dauern an (1\_3\_4).

### **Phase 50.000 bis 150.000 Jahre**

Die natürliche Temperaturverteilung (geothermischer Gradient) ist nicht mehr von der Wärmeproduktion durch den radioaktiven Zerfall beeinflusst (3\_4\_1, 3\_4\_3).

Die Aktivierungsprodukte werden aus den Brennelementhülsen freigesetzt (3\_4\_9). Die Brennelementmatrix und die verglasten Abfälle unterliegen Umlösungsprozessen (1\_7\_9). Löslichkeitsgrenzen begünstigen die Wiederausfällung von Radionukliden im Nahfeld (1\_7\_5).

Gasbildung findet weiter statt (3\_2\_10). Ein Gasfluss findet entlang der Auflockerungszonen und in das Wirtsgestein statt (3\_2\_10). Der Gastransport erfolgt durch Diffusion, 2-Phasen-Fluss bis zur dilatanten Bildung von Wegsamkeiten.

Aus dem Klimaverlauf der vergangenen 1.000.000 Jahren ist in dieser Phase eine Kaltzeit zu erwarten (1\_3\_4).

Sie beginnt mit einer Zwischeneiszeit, deren Dauer ca. 20.000 – 50.000 Jahre betragen kann. Die Erosion verändert die Geomorphologie und die Grundwasserströmungen (1\_5\_x). Der Übergang zur Eiszeit dauert weitere 50.000 Jahre. Weitere Veränderungen der Geomorphologie mit bedeutender Umverteilung von Fest- und Lockergestein und abnehmenden Grundwasserhaushalt treten ein (1\_4\_x). Die eigentliche Eiszeit dauert 10.000 bis 50.000 Jahre. Der Standort erfährt dauerhaften Permafrost und kann mit Eis von mehreren 100 m Mächtigkeit überdeckt werden (1\_3\_5).

Der Übergang von der Eiszeit zur Zwischeneiszeit erfolgt in wenigen Jahrtausenden. Die Eisbedeckung und Gletscher schmelzen ab. Große Veränderungen der Geomorphologie, rasch ändernde Grundwasserverhältnisse und topographische Verhältnisse sind damit verbunden. Zahlreiche Seen bilden sich, eine große Umverteilung von Fest- und Lockermaterial und Veränderungen der Wasserwege durch Erosion und Sedimentation finden statt (1\_4\_x). Die Eisüberfahung hat die Morphologie des Geländes geändert. Es werden vorhandene Sedimente abgetragen, aber auch neue Sedimente gebildet (1\_4\_4). Die Bildung von Rinnensystemen aufgrund der Erosionsleistung von Schmelzwässern ist möglich (1\_4\_1). Die Rinnensysteme erreichen aber das Endlager bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht.

Die Grundwasserströmungen sind grundlegend verändert (1\_5\_5). Tektonische Prozesse sind vernachlässigbar. Der Temperaturgradient im Deckgebirge ist geändert, die Auswirkungen sind für das Endlager in einer Teufe von 400 m allerdings gering (2\_1\_7).

Je nach Typ der Eiszeit (z. B. Weichsel, Elster, Saale) treten Änderungen der hydraulischen Durchlässigkeit der oberen Tongesteinsschichten auf (1\_2\_16).

Die rückhaltende Wirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereich in Verbindung mit dem Versatzeigenschaften und dem Wirtsgestein bleibt erhalten.

Eine zweite Kaltzeit mit Permafrost bis hin zur vollständigen Eisüberdeckung beginnt erst nach 150.000 Jahren (1\_3\_4, 1\_3\_9).

### **Phase 150.000 bis 1.000.000 Jahre**

Strahlungsbedingte Veränderungen im Abfall, Fixierungsmittel oder Abfallbehälter halten weiter an (3\_4\_x). Die Gasbildung ist abgeschlossen (3\_2\_3).

Mehrere Kaltzeiten mit Permafrost/ Eisüberdeckungen werden erwartet (1\_3\_4). Die zeitliche Abfolge ist nicht vorhersagbar. Das Ausmaß einer Eiszeit kann von dauerhaften Permafrost bis hin zu einer Eisüberdeckung von mehreren hundert Metern reichen. Die Grundwasserströmungsverhältnisse werden mehrfach grundlegend verändert (1\_3\_8).

Die Eisüberfahrungen ändern die Morphologie des Geländes mehrfach (1\_5\_1). Es werden vorhandene Sedimente abgetragen, aber auch neue Sedimente gebildet (1\_4\_4). Je nach Typ der Eiszeit (z. B. Weichsel, Elster, Saale) treten aufgrund der Auflast Änderungen der hydraulischen Durchlässigkeit der Tonschichten auf (1\_5\_3). Die Bildung von Rinnensystemen aufgrund der Erosionsleistung von Schmelzwässern ist möglich (1\_4\_1). Die Rinnen erreichen den einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers nicht.

Die rückhaltende Wirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereich für Radionuklide bleibt in Verbindung mit den Streckenverschlüssen und dem Wirtsgestein erhalten.

### **Zusammenfassung Tonsteinstandort**

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt in der erwarteten Entwicklung ungestört. Die Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager im Wirtsgestein Ton findet nur durch Diffusionsprozesse unter Rückhaltung durch Sorption statt. Das Ausmaß der Freisetzung genügt der Geringfügigkeitsbedingung.

## **5 Funktionsanalyse**

Die Funktionsanalyse beinhaltet die methodische Untersuchung aller möglichen Einfluss nehmenden FEP auf die SF des Endlagersystems und seiner Umgebung. Das Ergebnis der Funktionsanalyse stellt ein wesentliches Element für die Ableitung von Szenarien dar.

Die Durchführung der Funktionsanalyse sollte zum einen unter Zuhilfenahme von erforderlichen Datengrundlagen (z. B. FEP-Datenbasis), die ggf. in einer Datenbank vorliegen und somit eine rechnergestützte Recherche ermöglichen, und zum anderen an-

hand einer fachlichen Interpretation erfolgen. In der Funktionsanalyse ist zu untersuchen, welche FEP auf welche SF wirken (s. Kapitel 5.1).

Darüber hinaus werden die Unwirksamkeit einer oder mehrerer SF unterstellt und alle vorstellbaren Möglichkeiten unter Einbeziehung von FEP die zu einer solchen Aufhebung führen können untersucht (s. Kapitel 5.2). Abschließend erfolgt eine Analyse von möglichen Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen von SF untereinander (s. Kapitel 5.3).

Die Grundlage für die Funktionsanalyse bilden die Vorarbeiten wie die erstellte FEP-Datenbasis (Kapitel 3.2.2 und 3.2.3), die Zuordnung von FEP zu SK (Kapitel 3.2.4) und die Festlegung von SF (Kapitel 3.3.3).

In der Analyse ist auf die gruppierten SF (s. Kapitel 3.3.3 bzw. Abb. 3.5) und bei Bedarf auf die spezifischen Gegebenheiten der SK, die die SF auszuführen hat, einzugehen. Eine wirtsgesteinsspezifische Unterscheidung ist darin vorzunehmen.

In der Anwendung der Methodik auf zu vergleichende Standorte stellt die Funktionsanalyse, wie bereits erwähnt, ein wesentliches Element zur Ableitung von Szenarien dar. Unter Beachtung der beiden Standorte, der insgesamt 50 Sicherheitsfunktionen (Kap. 3.3) und der durchzuführenden Diskussion jeder SF entlang Einfluss nehmender FEP wird deutlich, dass dieser Teil der Methodik nicht nur fachlich ansprechend sondern auch sehr zeitintensiv ist. In Bezug auf die Zielstellung, eine Methodik zur Ableitung von Szenarien zu erarbeiten, werden in den folgenden Unterkapiteln die durchzuführenden Schritte der Funktionsanalyse beispielhaft demonstriert. Die beispielhafte Darstellung ist dabei so gewählt, dass die Intention, der Ablauf und die Ergebnisse einer Funktionsanalyse in nachvollziehbarer Weise beschrieben werden und im Hinblick auf eine spätere umfängliche Anwendung übertragbar sind.

Die in der Funktionsanalyse zu betrachtenden Prozesse und Mechanismen werden benannt, und wenn für das weitere Verständnis erforderlich auch kurz beschrieben, jedoch nicht im Detail ausgeführt, da eine ausführliche Beschreibung bereits in dem Teilvorhaben WS 2044 für Salz /GRS 09/ und Ton /COL 09/ erfolgte und hinsichtlich einzelner FEP umfassende Beschreibungen vorliegen /BGR 01, ISI 08, NAG 02, NAG 07, NEA 06a/.

Auch die Funktionsanalyse ist von subjektiven Entscheidungen bzw. Einflüssen begleitet, die in Kapitel 7 näher erläutert werden.

## **5.1 Einfluss nehmende Faktoren auf festgelegte Sicherheitsfunktionen**

In diesem Kapitel werden die Einfluss nehmenden Faktoren auf die Sicherheitsfunktionen bestimmt. Als Ausgangspunkt für diese Bestimmung wird die erstellte Datengrundlage (siehe Kapitel 3.2.4 und Anhang 3) herangezogen (Schritt 1). Die Datengrundlage enthält die Zuordnung von FEP zu SK. Im nächsten Schritt werden rechnergestützt die zugeordneten FEP zu einer bestimmten SK selektiert (Schritt 2) und in einer Matrix den festgelegten SF (siehe Kapitel 3.3.3 und Abb. 3.5) zu dieser SK gegenübergestellt (Schritt 3). Anschließend ist anhand der Vorselektion für jedes FEP der mögliche Einfluss entlang der festgelegten SF zu diskutieren und ggf. durch einen entsprechenden Eintrag (z. B. x) in der Matrix kenntlich zu machen (Schritt 4). Im Anhang 8 sind über alle Sicherheitsfunktionen und Systemkomponenten die zugeordneten FEP in Form einer Matrix enthalten. Für die weitere Untersuchung (Kapitel 5.2) ist es hilfreich, die diskutierten und zugeordneten FEP nach Möglichkeit zu gruppieren (Schritt 5).

Die beschriebene Vorgehensweise wird im Folgenden an einem Beispiel demonstriert:

### **Beispiel:**

Das Beispiel bezieht sich auf die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“, die durch die Systemkomponente „Wirtsgestein“ für den Endlagerstandort in Salz wahrgenommen wird. Das Wirtsgestein bezieht sich hierbei auf den Bereich, der an den ewG anschließt.

Anmerkung:

Hierbei ist festzustellen, dass die SF außerhalb des ewG liegt. Genau genommen, handelt es sich nicht um eine rückhaltende SF, da die sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an die Radionuklidrückhaltung am Rand des ewG enden. Dementsprechend werden außerhalb des ewG vorhandene rückhaltende Wirkungen als Sicherheitsreserve bezeichnet. Für die weitere Betrachtung und der beispielhaften Erläuterung der entwickelten Methodik der Szenarienentwicklung ist dieser Unterschied nicht von Bedeutung. Im Folgenden wird daher auch hier von einer SF gesprochen.

### **Schritt 1:**

Einbeziehung der Datengrundlage in Bezug auf zugeordnete FEP zu einer bestimmten SK.

Die Abb. 5.1 zeigt einen Ausschnitt aus der Datengrundlage (Anhang 3) von zugeordneten FEP zur SK Wirtsgestein (WG).

### **Schritt 2:**

Selektion der relevanten Sicherheitsfunktionen für WG in Salz (siehe Abb. 3.5). Das Ergebnis der Selektion ist im Folgenden wiedergegeben:

- SF\_4: Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen (Schutzfunktion)
- SF\_8: Integritätserhalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion (Schutzfunktion)
- SF\_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts (Rückhaltung)
- SF\_10: Rückhaltung gasförmiger Radionuklide (Rückhaltung)

Die folgende SF, die auch in Abb. 3.5 angegeben ist, wird für das WG (Salzstandort) nicht betrachtet (relevant für Tonsteinstandort)

- SF\_19: Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption (Rückhaltung)

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Zuord	
		WG	
1_2_1	Kriechen des Gesteins	1	Anhang 3: Zuordnungsmatrix FEP zu Systemkomponenten
1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik	1	
1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	1	
1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	1	
1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Kluftsystemen)	1	
1_2_9	Gesteinsheterogenitäten	1	
1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	1	
1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	1	
1_2_16	Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften	1	
1_3_2	Klimatische Variabilität	2	
1_3_3	Extremer Niederschlag	2	
1_3_4	Kaltzeit (Glazial)	1	
1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)	1	
1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")	2	
1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem	2	
1_3_9	Warmzeiten (Interglazial)		
1_4_1	Rinnenbildung	1	
1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung	2	
1_4_3	Denudation (flächenhafte Abtragung)		
1_4_4	Sedimentation, Sedimenttransport		
1_4_5	Subrosion	1	

Abb. 5.1: Ausschnitt aus der Datengrundlage (Anhang 3) in Bezug auf zugeordnete FEP zum Wirtsgestein (WG)

### Schritt 3:

Erstellung der Matrix, die die Gegenüberstellung der FEP aus der Vorselektion zum WG und den festgelegten SF beinhaltet. Der Aufbau der Matrix ist in Abb. 5.2 dargestellt.

LFD_NR	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	SK_NR	Sicherheitsfunktionen zum WG (Salzstandort)			
			14	SF_4: Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	SF_8: Integritätschutz des ewG vor Erosion und Subrosion	SF_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	SF_10: Rückhaltung gasförmiger Radionuklide
			WG				
1	1_2_1	Kriechen des Gesteins	1				
2	1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik	1				
3	1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	1				
4	1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	1				
5	1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Kluftsystemen)	1				
6	1_2_9	Gesteinheterogenitäten	1				
7	1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	1				
8	1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	1				
9	1_2_16	Gesteineigenschaften, Standorteigenschaften	1				
10	1_3_2	Klimatische Variabilität	2				
11	1_3_3	Extremer Niederschlag	2				
12	1_3_4	Kaltzeit (Glazial)	1				
13	1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)	1				
14	1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")	2				
15	1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem	2				
17	1_4_1	Rinnenbildung	1				
18	1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung	2				
21	1_4_5	Subrosion	1				

Abb. 5.2: Ausschnitt der Matrix mit der Gegenüberstellung von FEP aus der Vorselektion zum WG und den festgelegten SF

#### Schritt 4:

Die erstellte Matrix aus Schritt 3 bildet die Arbeitsgrundlage für diesen Schritt, in dem die aus der Vorselektion ermittelten Einfluss nehmenden FEP auf die SK nun dahingehend diskutiert werden, inwiefern ein Einfluss auf die entsprechenden SF gegeben ist. Das Ergebnis der Diskussion wird in der Matrix in Form eines Eintrages (x) kenntlich gemacht. Hierbei ist es durchaus möglich, dass ein bestimmtes FEP auf mehrere SF einen Einfluss haben kann. Die Abb. 5.3 zeigt ausschnittsweise die zugeordneten FEP zu den SF.

Es ist noch anzumerken, dass dieser Arbeitsschritt subjektive Merkmale beinhaltet, die in Kapitel 7 näher erläutert werden.

LFD_NR	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	SK_NR	Sicherheitsfunktionen zum WG (Salzstandort)			
			14	SF_4: Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	SF_8: Integritätsverlust: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion	SF_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	SF_10: Rückhaltung gasförmiger Radionuklide
1	1_2_1	Kriechen des Gesteins	1	x		x	
2	1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonek	1	x	x	x	
3	1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	1	x		x	
4	1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	1	x		x	
5	1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Kluftsystemen)	1	x		x	
6	1_2_9	Gesteinsheterogenitäten	1	x		x	
7	1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	1	x		x	
8	1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	1	x		x	
9	1_2_16	Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften	1	x		x	
10	1_3_2	Klimatische Variabilität	2	x	x		
11	1_3_3	Extremer Niederschlag	2	x		x	
12	1_3_4	Kaltzeit (Glazial)	1	x		x	
13	1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)	1	x		x	
14	1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")	2	x		x	
15	1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem	2			x	
17	1_4_1	Rinnenbildung	1	x		x	
18	1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung	2		x		
21	1_4_5	Subrosion	1		x		
22	1_5_1	Änderungen des Flusslaufs, Wasserspiegel im See	2			x	

Abb. 5.3: Ausschnitt der Matrix (analog Abb. 5.2) und dem Eintrag (gekennzeichnet mit x) hinsichtlich Einfluss nehmender FEP auf die SF

### Schritt 5:

Für das o. g. Beispiel ist die Zuordnung von FEP zur Sicherheitsfunktion „SF\_9: Begrenzung/ Verzögerung des Lösungszutritts“ relevant. Hier ist anzumerken, dass die genannte SF sich auf die gruppierte Sicherheitsfunktion bezieht. Die spezifische Sicherheitsfunktion zum WG nach Anhang 5 lautet:

- SF\_NR 56: Begrenzung/ Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG

Um die nachfolgende Untersuchung hinsichtlich einer möglichen Einschränkung bzw. Aufhebung von Sicherheitsfunktionen (Kapitel 5.2) zu erleichtern, bietet es sich an, die entsprechenden zugeordneten FEP nach Möglichkeit zu gruppieren. Für die in diesem Beispiel betrachtete SF und unter Einbeziehung der relevanten FEP macht es Sinn eine Gruppierung orientierend nach den Zusammenhängen für lösungs- bzw. wasserführende Wegsamkeiten vorzunehmen. Unter diesem Aspekt waren folgende Gruppen auszumachen:

- Faktoren die sich auf Merkmale, Eigenschaften etc. beziehen,
- Faktoren im Zusammenhang mit Wegsamkeiten,
- Faktoren im Zusammenhang mit Spannungsänderungen die zu Wegsamkeiten führen können und

- Faktoren im Zusammenhang mit einem Transportmedium (Wasser/ Lösung).

Die Tab. 5.1 zeigt die zugeordneten und gruppierten FEP (Faktoren).

Tab. 5.1: Gruppierung der zugeordneten FEP zu der SF Begrenzung/ Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG (WG, Salzstandort)

Faktoren die sich auf Merkmale, Eigenschaften etc. beziehen	Faktoren im Zusammenhang mit Wegsamkeiten	Faktoren im Zusammenhang mit Spannungsänderungen die zu Wegsamkeiten führen können	Faktoren im Zusammenhang mit einem Transportmedium (Wasser/ Lösung)
Gesteinsheterogenitäten	Kriechen des Gesteins	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik	Extremer Niederschlag
Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")
Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	Kaltzeit (Glazial)	Änderungen im Grundwassersystem
Standorterkundung	Rissbildung (Bildung von natürlichen Kluftsystemen)	Periglaziale Effekte (Permafrost)	Änderungen des Flusslaufs, Wasserspiegel im See
	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	Änderungen des Spannungsfeldes	Grundwasserfluss
	Rinnenbildung	Unterschiedliches elastisches Ansprechverhalten	Grundwassererneuerung
	Bruch- / Rissbildung	Nicht-elastisches Ansprechverhalten	Dehydration von Salzmineralien
	Wiederanpassung des Wirtsgesteins an Trennfugen	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	Induzierte hydrologische Änderungen
	Vorliegen und Verbindung von Resthohlräumen	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	
		Thermo-Mechanische-Effekte	

## 5.2 Untersuchung einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung von Sicherheitsfunktionen

Gegenstand dieses Kapitels bildet die Untersuchung, durch welche Mechanismen die an die SF gestellten und verbundenen Anforderungen entlang der zugeordneten FEP (s. Kapitel 5.1) eingeschränkt bzw. aufgehoben werden können. Die Untersuchung erfolgt auf der Basis plausibler Ablaufprozesse und der dazu notwendigen Bedingungen wird jedoch losgelöst von spezifischen Standortgegebenheiten vorgenommen. Gleichwohl werden bei der Untersuchung allgemeine wirtsgesteinsspezifische und geotechnische sowie konzeptionelle Eigenschaften von Systemkomponenten zu berücksichtigen sein. Die Diskussion, inwieweit die Ergebnisse der Funktionsanalyse auf die entsprechenden Standortgegebenheiten bzw. Standortbedingungen übertragen werden können ist Gegenstand des Kapitels 6 in dem die Ableitung von Szenarien dargestellt wird. Die getrennte Vorgehensweise in der entwickelten Methodik hat den Vorteil, dass bei veränderten bzw. anderen potenziellen Endlagerstandorten, die Funktionsanalyse erhalten bleibt bzw. zum überwiegenden Teil übernommen werden kann und

nur die Diskussion hinsichtlich der Ableitung der Szenarien nach den konzeptionellen und standortspezifischen Gegebenheiten erneut zu führen ist.

Der Ausgangspunkt der Untersuchung bildet die Hinterfragung, welcher Zweck mit der zu analysierenden SF verbunden ist (Schritt 1). In Abhängigkeit der Zweckerfüllung werden in einem nächsten Schritt denkbare Prozesse aufgestellt und erforderliche Bedingungen für deren Ablauf zusammengetragen, die eine Einschränkung bzw. Aufhebung der SF ermöglichen (Schritt 2). Hier ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass die Diskussion, ob diese Prozesse an dem realen Standort ablaufen können und die entsprechenden Bedingungen auch dafür vorliegen, im Rahmen der Ableitung von Szenarien geführt wird (Kapitel 6).

In einem abschließenden Arbeitsgang werden die zugeordneten und gruppierten FEP zur SF (s. Kapitel 5.1) in Bezug auf dessen Auswirkungs- bzw. Einflussmöglichkeit auf die aufgestellten Prozesse und zusammengetragenen Bedingungen diskutiert (Schritt 3).

Analog zum Kapitel 5.1 wird die beschriebene Vorgehensweise im Folgenden an einem Beispiel demonstriert:

### **Beispiel (analog zu Kapitel 5.1):**

Die weiteren Schritte der Funktionsanalyse werden an dem gleichen Beispiel, das in Kapitel 5.1 herangezogen wurde, fortgeführt. Das Beispiel bezieht sich auf die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“, die durch die Systemkomponente „Wirtsgestein“ für den Endlagerstandort in Salz wahrgenommen wird. Das Wirtsgestein bezieht sich auf den Bereich, der an den ewG anschließt.

Die Grundlage für die folgende Analyse bildet das Ergebnis aus Kapitel 5.1 (Matrix von zugeordneten FEP zu SF und Gruppierung der zugeordneten FEP).

### **Schritt 1:**

Die SF „Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“ bezogen auf das Wirtsgestein Salz dient letztendlich als Funktion zur „Radionuklidrückhaltung“. Die „Radionuklidrückhaltung“ besteht darin, einen Übergang von Lösungen aus dem Wirtsgestein in den Bereich des ewG zu verhindern bzw. zu begrenzen, um somit die Voraus-

setzung für einen daraus möglicherweise folgenden Radionuklidtransport zu unterbinden. Eine Begrenzung/Verzögerung ist eine unbestimmte Anforderung, die gegenüber einer Verhinderung von Lösungszutritten einen Übergang von Lösungen aus dem WG in den ewG für zulässig erscheinen lässt. Mit der Begrenzung/Verzögerung ist jedoch eine Limitierung hinsichtlich Menge und Zeit von möglichen zutretenden Lösungen verbunden. Für die SF wird Begrenzung/Verzögerung so definiert, dass ein Zutreten von Lösung nach dem Geringfügigkeitsprinzip in dem Maße zulässig ist, dass in keiner Weise die einschlusswirksamen Eigenschaften des ewG beeinträchtigt werden. Als primäre Anforderung für den Endlagerstandort in Steinsalz steht jedoch die prinzipielle Verhinderung eines Lösungszutrittes im Fokus.

Desweiteren beinhaltet die SF das Merkmal „Lösungszutritt“, dass bei der Untersuchung der Einschränkung/ Aufhebung von Sicherheitsfunktionen näher zu diskutieren ist. Mit dem genannten Merkmal ist die Bedingung geknüpft, dass im WG Lösungen bzw. Wässer vorliegen müssen. Weiterhin ist mit einem Zutritt in den ewG ein Stofftransport verbunden, der über verschiedene Prozesse erfolgen kann. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 5.4 schematisch dargestellt. Darüber hinaus sind die Bedingungen zu erfüllen, dass sowohl die Systemkomponente WG und ewG vorhanden sein müssen. D. h., rein formal gesehen macht die Diskussion der hier betrachteten SF keinen Sinn, wenn eine der Systemkomponenten nicht vorliegt bzw. im Falle des ewG die einschlusswirksame Isolationswirkung aufgehoben ist. Zwischen WG und ewG ist keine physische Grenze oder Barriere vorhanden. Der ewG ist ein deklariertes Bereich um die eingelagerten Abfälle, dessen imaginäre Grenzen über Einschätzungen, Plausibilitätsbetrachtungen, orientierende Rechnungen und/ oder regulatorische Festlegungen ausgemacht werden. Gemäß seiner Definition (s. Kapitel 3.1.2) hat der ewG im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen die Isolation der Abfälle sicherzustellen. Im Regelfall besteht der ewG am Übergang zum WG aus dem gleichen Material bzw. geologischer Schicht wie das Wirtsgestein. Damit ist ein möglicher Lösungstransport an der Grenze vom WG und ewG als ungehinderter Übergang zu betrachten.

Hinsichtlich des Wirkungszeitraumes der hier betrachteten SF, d. h. die zeitliche Phase in der die Anforderungen durch die SF zu erfüllen sind, wird der Zeitraum ab Verschluss des Endlagers bis zum Ende des Nachweiszeitraumes zugrunde gelegt (s. auch Kapitel 5.3).

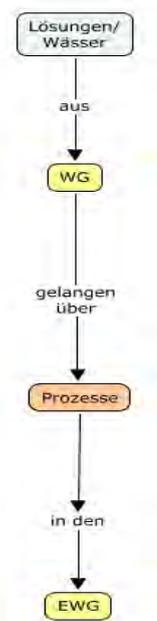


Abb. 5.4: Schematische Darstellung von möglichen Lösungszutritten aus dem WG in den ewG

Die Abb. 5.4 bildet das Grundgerüst für die weiteren Schritte und bleibt daher in den folgenden Abbildungen als Kernstück enthalten. Es wird gemäß den nachstehenden Erläuterungen aus Schritt 2 und 3 durch zusätzliche Elemente ergänzt.

### Schritt 2:

Aus den Betrachtungen in Schritt 1 wird deutlich, dass zur Aufhebung der Sicherheitsfunktion neben dem Vorhandensein der Systemkomponenten weitere Bedingungen vorliegen müssen. Eine weitere Bedingung ist, dass Lösungen/ Wässer im WG vorliegen müssen. Hierzu sind im Prinzip drei mögliche Quellen denkbar:

- vorhandene Lösungen/ Wässer im WG,
- vom Menschen eingebrachte Lösungen/ Wässer und
- zutretende Lösungen/ Wässer in das WG von außen.

Bei den vorhandenen Lösungen/ Wässer im WG ist zu unterscheiden zwischen dem am Salz gebundenen Wasser (auf Korngrenzen oder im Salzkristall eingeschlossen) und der aufgrund der natürlichen vorkommenden geologischen Gegebenheiten vorzufindenden Salzlösungen.

Hinsichtlich der auf anthropogenen Aktivitäten zurückzuführenden Lösungen/ Wässer im Wirtsgestein ist zu unterscheiden zwischen konstruktions- und betriebsbedingten Flüssigkeiten z. B. beim Abteufen des Schachtes und derjenigen Flüssigkeiten, die möglicherweise in der Phase nach Verschluss des Endlagers z. B. durch Injektion eingebracht werden.

Für die dritte Quelle der zutretenden Lösungen/ Wässer in das WG von außen, ist ebenfalls eine weitere Differenzierung vorzunehmen. Hier besteht die Möglichkeit, dass z. B. Oberflächenwässer/ Grundwässer im direkten Kontakt mit dem Wirtsgestein stehen oder über die Systemkomponente geologische Umgebung (GU) wie das Deck-/ Nebengebirge in das Wirtsgestein gelangen. Vorstellbar ist auch die Möglichkeit, dass Lösungsvorkommen aus angrenzenden geologischen Schichten (ebenfalls GU) mit dem Wirtsgestein in Verbindung treten können.

Zusätzlich zu der Bedingung von Lösungen/ Wässer im Wirtsgestein ist der Frage nachzugehen, durch welche Prozesse diese in den ewG transportiert werden können. Mögliche Transportprozesse sind hierbei die Diffusion, Thermomigration und Advektion. Mit der Betrachtung von Transportprozessen geht immer die Frage einher, über welchen Transportpfad ein Transport erfolgt.

Im Falle der Diffusion bilden Konzentrationsunterschiede die treibende Kraft für einen Transport im Feststoffgefüge. Der Transportpfad wird hierbei durch die Eigenschaftsmerkmale wie die Porosität/ Permeabilität und des geologischen Aufbaus des WG bestimmt.

Die Thermomigration beinhaltet den Transport von an Salz gebundenes Wasser und Lösungseinschlüssen im Wärmefeld. Ausgehend von den Wärme produzierenden Abfällen wird der Einlagerungsbereich, der ewG und zu einem späteren Zeitpunkt das angrenzende Wirtsgestein aufgeheizt. Im Temperaturgradienten dringen möglicherweise vorhandene Lösungen/ Wässer im Salzgestein in Richtung der höheren Temperatur vor. Der Mechanismus hierzu wird auf die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten in der Lösung und im Salz zurückgeführt. Das Salz besitzt eine größere Wärmeleitfähigkeit als die Lösung. D. h., dass die Wärme in der Lösung weniger schnell abtransportiert wird und die Temperatur daher höher ist als am angrenzenden Feststoff. Die eingeschlossene Flüssigkeit auf der der Wärmequelle zugesandten Seite wird somit Salz lösen und auf der abgewandten Seite wieder ausfällen. Hierdurch migrieren Wässer und Lösungseinschlüsse auf die Wärmequelle zu /OLA 80, OLA 84/.

Bei der Advektion findet der Transport der Lösung mit der Strömung statt. Treibende Kräfte für den advektiven Lösungstransport sind hydrostatische Druckunterschiede, resultierend aus unterschiedlichen Teufenlagen, und unterschiedlichen aufgeprägten Drücken aufgrund von Konvergenzvorgängen. Ein advektiver Prozess im WG ist aufgrund der geringen Permeabilität im Salzgestein nicht plausibel. Unter Vorhandensein von Klüften, Rissen, Diskontinuitäten usw. im WG würde jedoch ein advektiver Stofftransport begünstigt.

Die Abb. 5.5 zeigt schematisch das Grundgerüst aus Abb. 5.4 und die zusätzlichen Elemente aus der geführten Diskussion zu den Bedingungen wie das Vorhandensein von Lösungen/ Wässern und Prozesse, die vorliegen müssen, um einen Lösungszutritt vom WG in den ewG zu ermöglichen.

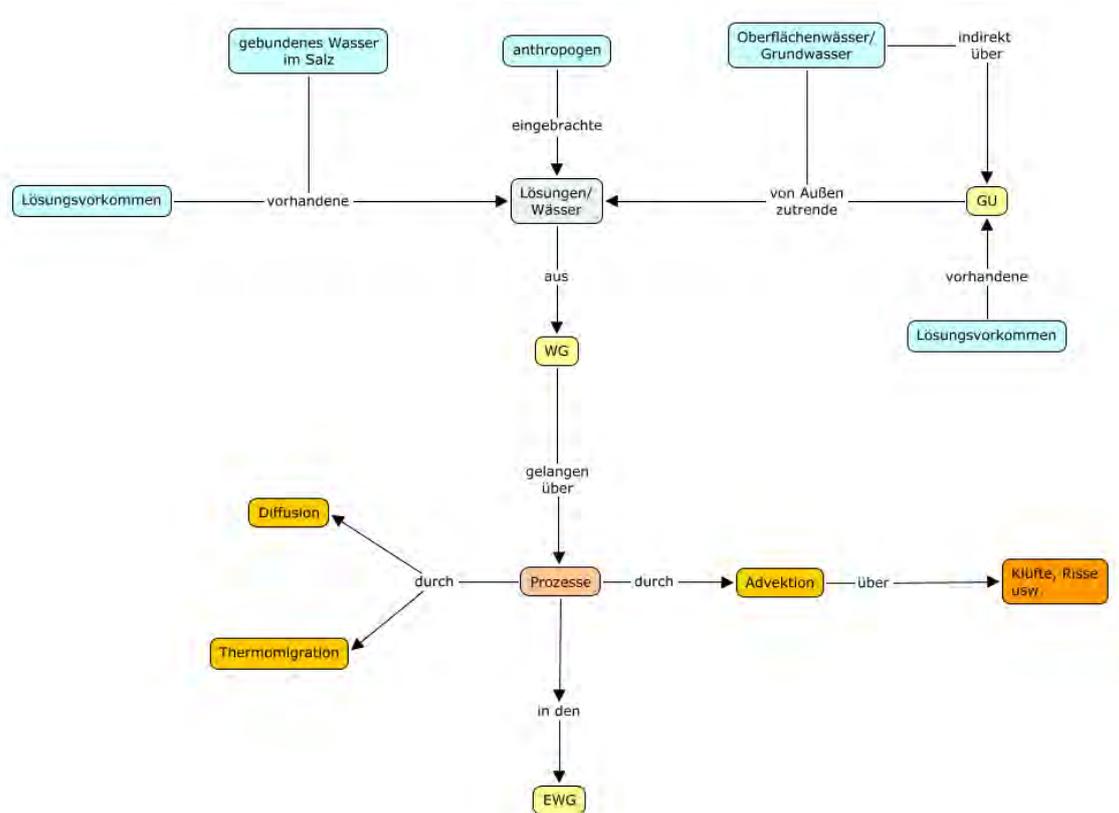


Abb. 5.5: Schematische Darstellung von möglichen Lösungszutritten aus dem WG in den ewG unter Einbeziehung von möglichen Quellen an Lösungen/ Wässern und Transportprozessen

### **Schritt 3:**

Die im Schritt 2 behandelten Bedingungen werden unter Einbeziehung der identifizierten und zugeordneten FEP aus Kapitel 5.1 diskutiert.

#### Lösungen/ Wässer

Bei den vorhandenen Lösungen/ Wässer im WG sind die an Salz gebundenen Wässer in Betracht zu ziehen. Gebundenes Wasser an Salz ist ein natürliches Merkmal. Die Wassergehalte im Salz können u. a. in Abhängigkeit der Standortverhältnisse und der Entstehungsgeschichte des Salzstockes variieren. Eine Freisetzung der gebundenen Wässer kann über eine Dehydration der Salzminerale erfolgen. Dazu sind jedoch Temperaturen weit über die vorgegebene und einzuhaltende Maximaltemperatur von 200 °C erforderlich. Die Maximaltemperatur wird voraussichtlich nur an der Behälteroberfläche erreicht. Die Temperaturen nehmen mit zunehmendem Abstand vom Einlagerungsbereich ab. Aus den genannten Gründen ist von einer Dehydration von Salzmineralien im WG nicht auszugehen.

Auch Lösungsvorkommen im Salzgestein sind ein natürliches Merkmal. Für die Entwicklung von Szenarien ist die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, dass neben den möglicherweise bereits bekannten Lösungsvorkommen im Salz auch noch Bereiche mit Salzlösungen vorliegen können, die nicht detektiert wurden. Die hierzu relevanten FEP beziehen sich auf die Standorterkundung und eine Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen. So werden durch die Standorterkundung mögliche Lösungsvorkommen identifiziert. Jedoch ist es nicht ganz auszuschließen, dass durch technisches und/ oder menschliches Versagen lösungserfüllte Bereiche unentdeckt bleiben.

Eine weitere Quelle für Lösungen/ Wässer, die in das WG eingebracht werden könnten sind auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Solche Wässer/ Lösungen resultieren möglicherweise aus der Konstruktions- und Betriebsphase des Endlagers oder aus der Phase nach Verschluss des Endlagers. Mögliche eingebrachte Wässer/ Lösungen in das WG in der Zeitphase nach dem Verschluss des Endlagers sind den zukünftigen menschlichen Aktivitäten zuzuordnen. Die zukünftigen menschlichen Aktivitäten werden in VerSi gemäß den Randbedingungen nicht weiter untersucht.

Die dritte Quelle der zutretenden Lösungen/ Wässer von außen, bezieht sich auf die Möglichkeit eines direkten Kontaktes von Oberflächenwässer mit dem WG oder indirekt

über Oberflächenwässer/ Grundwässer und möglichen Lösungsvorkommen, die aus den angrenzenden geologischen Schichten in das WG eindringen könnten. Die zugeordneten FEP zu dieser Quelle beziehen sich auf natürliche Phänomene, die insbesondere das Angebot an Oberflächenwässer und damit auch Grundwässer bestimmen, und auf Mechanismen, die eine Änderung der hydrologischen Situation und des Grundwassersystems nach sich ziehen. Im Folgenden sind die entsprechenden FEP aufgeführt:

- Natürliche Phänomene mit Einfluss auf das Angebot von Oberflächenwässer/ Grundwässer
  - Klima
  - Kaltzeit
  - Extremer Niederschlag
  - Änderung des Meeresspiegels
  - Änderung des Flusslaufes, Wasserspiegel im See
  - Grundwasserfluss
  - Grundwassererneuerung
- Mechanismen mit Einfluss auf die Hydrologie
  - Induzierte hydrologische Änderung
  - Änderungen im Grundwassersystem

Hinsichtlich der Lösungsvorkommen in angrenzenden Schichten (GU) werden die gleichen FEP betrachtet, die auch in der Quelle vorhandene Lösungsvorkommen im WG angesprochen wurden. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass mögliche Lösungsvorkommen im Endlagerhorizont durch den Prozess einer vorseilenden Subrosion bei der Untersuchung der folgenden SF (s. Kapitel 5.1, Schritt 2) des WG zu behandeln sind:

- SF\_8: Integritätserhalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion (Schutzfunktion)

Die Funktionsanalyse wird wie eingangs zu Kapitel 5 erwähnt illustrativ vorgenommen. Die o. g. SF zum Integritätserhalt ist in der beispielhaften Darstellung nicht einbezogen.

Auf den Punkt der vorausseilenden Subrosion wird jedoch gesondert unter Kapitel 5.3 und 6.2 eingegangen.

### Transportprozesse

Neben der notwendigen Bedingung Wasser oder Lösungen im WG vorliegen zu haben, ist zu untersuchen, über welche Mechanismen und unter welchen Voraussetzungen ein Transport der Flüssigkeiten zum ewG erfolgen kann. Im Schritt 2 wurden mögliche Transportarten aufgezeigt die in Weiterem unter Einbeziehung von FEP behandelt werden.

Zu den möglichen Transportarten gehört die Diffusion, in der der Konzentrationsgradient die treibende Kraft für den Transport durch das Feststoffgefüge darstellt. Diffusionsprozesse im Feststoff sind u. a. bestimmt durch die Größen Porosität/ Permeabilität. Das Hauptsalz eines Salzstockes hat eine sehr geringe Porosität und Permeabilität, die im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen zu einem vernachlässigbaren Transport durch Diffusion führen. Nur eine über größere Bereiche vorliegende Inhomogenität im Gesteinsverband könnte dazu führen, dass der Prozess der Diffusion im WG an Bedeutung zunimmt. In diesem Zusammenhang sind die FEP Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften sowie Gesteinsheterogenitäten zu berücksichtigen.

Die Thermomigration beinhaltet den Transport von an Salz gebundenes Wasser und Lösungseinschlüssen im Wärmefeld. Hierzu sind hohe Wärmegradienten notwendig, die im Endlagersystem allenfalls von den Wärme produzierenden Abfällen induziert werden können. Allerdings nimmt die Temperatur im Endlagersystem mit zunehmendem Abstand von den eingelagerten Abfällen ab. Auf den Transportprozess der Thermomigration haben daher die FEP Wärmeproduktion und Temperaturentwicklung einen entscheidenden Einfluss.

Von den möglicherweise relevanten Transportarten verbleibt noch die Advektion, die allerdings im WG nur dann eine wesentliche Rolle spielt, wenn Transportpfade wie Klüfte, Risse usw. vorliegen. Hinsichtlich der Transportpfade sind im Prinzip folgende zwei Möglichkeiten zu untersuchen, die wiederum weiter differenziert werden können:

- Vorliegende Klüfte, Risse usw.
  - bekannte
  - unentdeckte

- Entstehende Klüfte, Risse usw.
  - generierende Mechanismen
  - reaktivierende Mechanismen

Im Zusammenhang mit Klüften, Rissen usw. sind weiterhin verheilende Mechanismen zu diskutieren, die insbesondere im Salz ein hohes Potenzial aufweisen.

Analog zu den Lösungsvorkommen, ist ebenso bei den Klüften, Rissen usw. eine Aufteilung nach bekannten und unentdeckten Wegsamkeiten im WG vorzunehmen. Auch hier sind die relevanten FEP für eine solche Betrachtung ähnlich. Die FEP beziehen sich auf die Standorterkundung und eine Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen. So werden durch die Standorterkundung mögliche vorliegende Wegsamkeiten oder miteinander verbundene Resthohlräume identifiziert. Jedoch ist es nicht ganz auszuschließen, dass durch technisches und/ oder menschliches Versagen Klüfte, Risse usw. unentdeckt bleiben. Die einzubeziehenden FEP beziehen sich daher wiederum auf die Standorterkundung und Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen.

Neben den möglicherweise vorliegenden Wegsamkeiten besteht die Möglichkeit, dass Klüfte, Risse usw. in der Phase nach dem Verschluss des Endlagers im WG bzw. GU generiert werden. Hier wären die Bildung und Aktivierung von Störungen, Brüchen, Rissen, Rinnen und durchlässigen Diskontinuitäten denkbar. Ein wesentlicher Bestandteil für die Diskussion sind hierbei die generierenden Mechanismen.

Im Allgemeinen können große Spannungsänderungen im Endlagersystem zur Ausbildung von Wegsamkeiten führen. Derartige Spannungsänderungen werden durch rasch ablaufende Ereignisse wie z. B. Erdbeben und Vulkanismus hervorgerufen. Die genannten natürlichen Ereignisse (Erdbeben, Vulkanismus) sind aufgrund der Standortauswahl auszuschließen.

Auch weniger rasch ablaufende Ereignisse können Änderungen des Spannungszustandes bewirken, die zu einer Rissbildung bzw. Kluffbildung im Salz führen können. Zu nennen sind die Spannungsänderungen aufgrund von Frost-Tau-Wechsel oder die Entstehung einer glazialen Rinne ausgelöst durch erosiv wirkende Schmelzwässer bei dem Rückzug von Gletschern.

In /LOU 79/ wird allgemein auf die Klufthbildung in Gesteinen durch Entlastung eingegangen. Hierin wird die Klufthbildung durch Beseitigung von Überlagerungsdruck zu den wirkungsvollsten jedoch weniger leicht nachweisbaren Vorgängen gezählt. So wird bei der Abtragung von Drücken aus der Überlagerung insbesondere durch das Einschneiden von Tälern eine signifikante Änderung der Spannungsverhältnisse im Gestein induziert. Mit dem Abtragungsprozess ist ein Abbau von Druckspannungen verbunden, der als Ursache für die Ausbildung von Klufthsystemen angesehen wird, die weit über die Eindringtiefe der Temperaturschwankungen und des Frostes hinausgehen. Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass die Klufthbildung durch Beseitigung von Überlastungsdruck in homogenen Tiefengesteinen am stärksten ausgeprägt sein dürfte.

Das Ereignis einer vollständigen Inlandvereisung mit hohen Eismächtigkeiten über dem Salzstandort und dem Rückzug der Eismassen durch die Schmelze lässt sich im Prinzip auf das beschriebene Phänomen der Klufthbildung durch Beseitigung von Überlagerungsdruck übertragen. Auch hier ist mit signifikanten Spannungsänderungen im Untergrund zu rechnen.

In der Phase des Vorrückens des Inlandeises ist der Standort durch horizontale Spannungen geprägt. Infolge der Überdeckung des Standortes durch die Eismassen nehmen die vertikalen Spannungen zu. Mit dem Abschmelzen und Rückzug des Eises in der Warmzeitperiode oder Interglazial werden die vertikalen Spannungen schneller abgebaut als die horizontalen Spannungen, das eine bevorzugte Aufweitung von horizontalen und flach einfallenden Klüften bewirkt.

Eine mögliche Rinnenbildung am Standort würde zudem noch in Analogie zu dem des o. g. Einschneiden von Tälern stehen. Darüber hinaus ist ein Salzstock durch homogenes Tiefengestein charakterisiert.

Weiterhin werden kryogene Effekte diskutiert, die zu Kontraktionsrissen im Salz, ausgelöst durch eine Abkühlung des Salzstockes infolge von Permafrost, führen können. So wird von kryogenen Klüften und Rissen in den bergmännisch erschlossenen Salzstöcken Bokeloh bei Wunstorf sowie Benthe und Lehrte-Sehnde bei Hannover berichtet, die einen Tiefgang bis 600 m aufweisen /BAU 91, DUP 00/.

Ein weiteres Phänomen, das ebenfalls im Zusammenhang mit Kaltzeiten steht, bezieht sich auf mögliche Auf- und Abwärtsbewegung im Vorland einer Inlandvereisung. Durch

diesen Vorgang können an unter Spannung stehenden Schwächezonen Erdbeben ausgelöst werden /ISI 08/.

Allgemein betrachtet, können Spannungsänderungen im WG zu Wegsamkeiten bzw. zur Reaktivierung verheilter Klüfte führen. Solche Spannungsänderungen werden neben den o. g. Mechanismen auch durch salztektonische bzw. halokinetische Vorgänge induziert. Die Halokinese beinhaltet den Aufstieg plastischen oder weniger dichten Materials aus tiefen Bereichen und das Durchbrechen des Materials durch das Hangende. Mit einem weiteren Aufstieg des Salzes ist eine Hebung und Erosion des Deckgebirges verbunden, wodurch das Deckgebirge in seiner Mächtigkeit reduziert wird. Im Deckgebirge können bedingt durch die mit dem Aufstieg verbundenen Spannungsänderungen Klüfte generiert bzw. reaktiviert werden.

Darüber hinaus können sich Spannungsänderungen durch Hebungs- und Absenkungsprozesse der Erdkruste ergeben. Die Erdkruste ist durch tektonische Vorgänge einer Vielzahl von veränderlichen Prozessen ausgesetzt. Die Hebung und Absenkung der Erdkruste, auch Epirogenese genannt, sind solche Prozesse, die über lange geologische Zeiträume andauern können. Für einen Teil von Norddeutschland sind Hebungsraten von durchschnittlich 0,01 mm/a festgestellt worden, wobei sich die nordöstlichen Teile der Norddeutschen Tiefebene in einer Absenkungsphase befinden. Die Absenkungsrate beträgt im Mittel ebenfalls 0,01 mm/a /BGR 01/.

Weitere Mechanismen beziehen sich auf Störungen bzw. Störungszonen. Mit der Bildung und Aktivierung einer Störung ist eine Trennfuge im Gebirge verbunden. Der Verbund von mehreren Störungen in einem räumlich ausgedehnten Bereich bildet eine Störungszone. Derartige Störungen und Störungszonen, die z. B. auf die Subrosion (dieser Effekt ist Gegenstand einer weiteren SF für die Systemkomponente WG) des Salzstocks oder auf die ablaufenden Mechanismen einer Eisüberfahung zurückgeführt werden können, sind nicht selten im Deckgebirge und im salzstocknahen Nebengebirge anzutreffen. Mit dem Vorliegen bzw. der Bildung von Störungen und Störungszonen sind möglicherweise Wegsamkeiten für Lösungen/ Wässer vom GU zum WG verbunden. Hierdurch ist noch keine Verbindung zum ewG gegeben, jedoch können eindringende Flüssigkeiten in das WG zu potenziellen Lösungseinschlüssen führen, die in Kombination mit anderen Mechanismen einen Beitrag zur Einschränkung oder Aufhebung der hier betrachteten SF leisten.

Abschließend in der Diskussion zur Entstehung und Reaktivierung von Wegsamkeiten ist noch auf die Möglichkeit von Spannungsänderungen aufgrund vorhabensbedingter Aktivitäten/ Handlungen und des Wärmeeintrages durch den Wärme entwickelnden Abfall einzugehen.

Mit der Erkundung des Standortes, der Konstruktion und dem Betrieb des Endlagers sind eine Vielzahl von Eingriffen in die umgebende geologische Struktur verbunden. So werden z. B. Tiefbohrungen zur Erkundung erstellt, Messtechnik eingebracht, Schächte, Strecken, Kammern und betriebsbedingte Hohlräume aufgefahren, Massen bewegt und gelagert, Verankerungen gesetzt und Ausbau betrieben. Diese Eingriffe haben Auswirkung auf das Spannungsfeld am Endlagerstandort. D. h., dass der Ausgangszustand durch die Handlungen gestört wird. Das System wird auf das so entstandene Ungleichgewicht mit Spannungsumlagerungen (z. B. Konvergenz des Steinsalzes) reagieren um somit einen Gleichgewichtszustand anzustreben. Mit den Spannungsumlagerungen werden Bereiche des Endlagersystems Druck- und Zugbelastungen ausgesetzt sein. Dadurch ist die Ausbildung von lokal instabilen Bereichen und/ oder die Generierung von Rissen nicht auszuschließen.

Aufgrund der Erwärmung in der Umgebung des Einlagerungsbereiches ist eine Ausdehnung des Gesteins verbunden, die in größerer Entfernung zu einer zughafter Entlastung des WG führen kann. Derartige Zugentlastungen im WG können außerdem durch nachlassende Zerfallswärmeproduktion oder eiszeitlicher Einwirkung infolge der damit verbundenen Abkühlung auftreten. Solche Vorgänge können aufgrund der geringen Zugbelastbarkeit von Salz zu Rissen führen.

Insbesondere an Grenzflächen zwischen Gesteinen mit unterschiedlichem Verformungsverhalten können große Spannungsgradienten entstehen. Beispiel hierfür ist das Hauptsalz und mögliche angrenzende Schichten aus Anhydrit.

Der Wärmeeintrag lässt aufgrund des Zerfalls der Radionuklide stetig nach. Die Temperaturen im gesamten System werden sich nach wenigen zehntausend Jahren derjenigen des ursprünglichen Temperaturfeldes angenähert haben. Die thermisch bedingten Spannungsänderungen werden daher auf den genannten Zeitbereich beschränkt sein.

Zusätzlich ist eine Kombination der beiden beschriebenen endlagerinduzierten Mechanismen denkbar, die zu einer Entstehung von Wegsamkeiten beitragen können. Hier

wird daran gedacht, dass nach Verschluss des Endlagers konstruktionsbedingte Spannungsumlagerungen noch nicht abgeschlossen sind und zusätzlich wärmeinduzierte Spannungen die Belastung erhöhen.

Eingangs zu der Betrachtung von möglichen Wegsamkeiten wurde bereits darauf hingewiesen, dass Salz das Potenzial hat Klüfte, Risse usw. wieder zu schließen. Hintergrund hierfür ist die Eigenschaft des Salzes elasto-viskoplastisch zu reagieren. D. h., das das Salz unter kompressiver Belastung anfängt zu fließen und somit Hohlräume wie Klüfte und Risse verschließt. Man spricht bei diesem Prozess auch von einer Verheilung. Der Verheilungsprozess wird von der Diffusion gesteuert und ist u. a. abhängig vom Wassergehalt im Porenraum. Durch das Vorliegen von Wasser werden chemische Reaktionen begünstigt, die zum Verheilungsprozess beitragen. Das belegen Klüfte, die durch Neubildungen von Salzmineralien ganz oder teilweise geschlossen sind /BGR 01/.

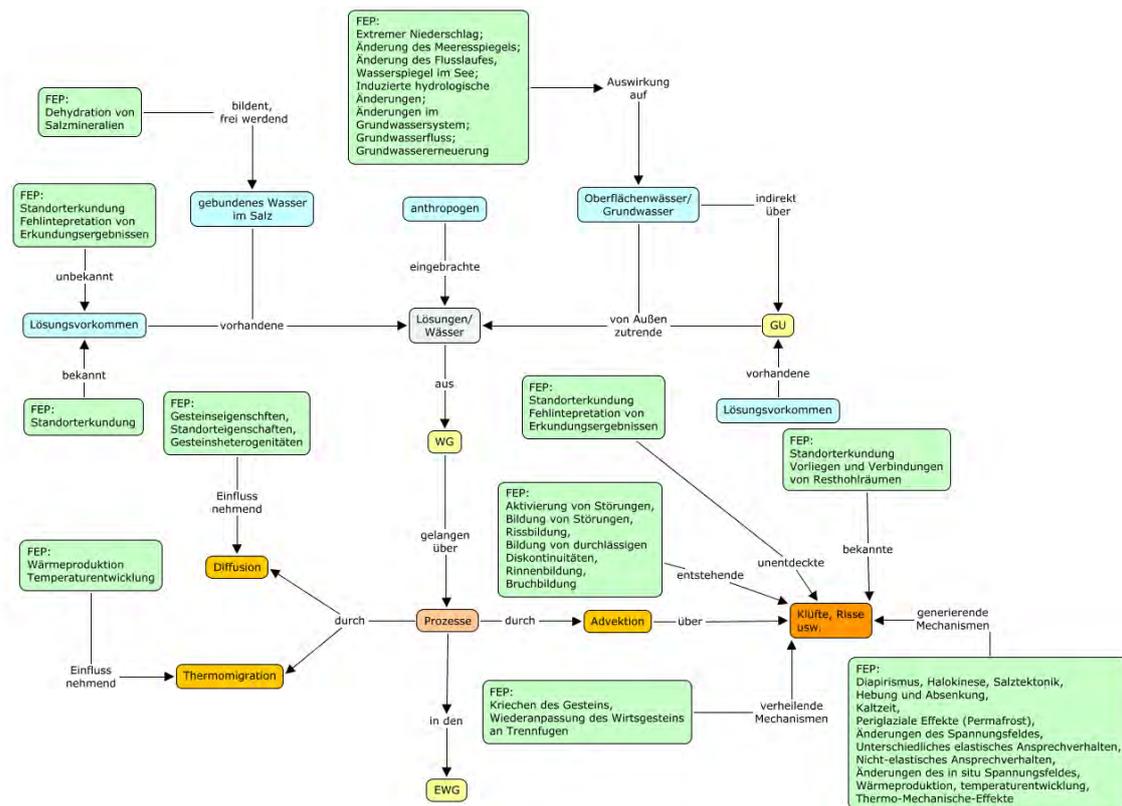


Abb. 5.6: Schematische Darstellung von möglichen Abläufen und Mechanismen zur Untersuchung einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/ Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“

Die Abb. 5.6 zeigt schematisch das Ergebnis der Funktionsanalyse aus den drei Schritten, wie das Grundgerüst aus Abb. 5.4, die zusätzlichen Elemente aus Abb. 5.5, die sich auf Lösungen/ Wässer sowie Transportprozesse beziehen und die Einfluss nehmenden FEP die in diesem Schritt der Funktionsanalyse diskutiert wurden.

### **5.3 Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von Sicherheitsfunktionen**

Das abschließende Kapitel zur Funktionsanalyse beinhaltet die Untersuchung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von Sicherheitsfunktionen. Bereits in Kapitel 3.3 wurden Aspekte aus der Literatur aufgezeigt, die auf folgende mögliche Abhängigkeiten der SF untereinander hinweisen:

- Eine SF ist abhängig von einer anderen SF,
- mehrere SF stehen in wechselseitiger Abhängigkeit zueinander und
- einige SF werden erst dann wirksam, wenn andere SF ihre Funktionswirkung verlieren.

Zunächst ist zu hinterfragen, mit welchen weiteren SF die betrachtete SF in Beziehung steht und welche Art von Abhängigkeiten bestehen. Hier sind auch mögliche Analogien von Bedingungen, Voraussetzungen und Mechanismen der einzelnen SF zu betrachten (Schritt 1). Die weitere Untersuchung beinhaltet die Klärung der Fragestellung, inwieweit sich bei identifizierten Beziehungen von SF der unterstellte Ausfall einer oder mehrerer SF auswirken könnte (Schritt 2). Abschließend sind die Wirkungszeiträume der in Beziehung zueinander stehenden SF zu diskutieren. Hieraus lässt sich ggf. ableiten, in welchem Zeitraum in Reserve stehende SF ihre Funktion aufnehmen und/ oder abhängige SF durch den möglichen Ausfall von anderen SF einer höheren Anforderung, Belastung usw. ausgesetzt sind (Schritt 3).

Die beschriebenen Schritte sollen beispielhaft zur Anwendung kommen. Wiederum wird das Beispiel betrachtet, dass bereits in Kapitel 5.1 und 5.2 zur Demonstration der Vorgehensweise herangezogen wurde, um somit eine abgeschlossene Funktionsanalyse an einer Sicherheitsfunktion in allen Detailschritten vorgenommen zu haben.

### **Beispiel (analog zu Kapitel 5.1 und 5.2):**

Zur besseren Nachvollziehbarkeit ist das herangezogene Beispiel im Folgenden nochmals aufgeführt:

Das Beispiel bezieht sich auf die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“, die durch die Systemkomponente „Wirtsgestein“ für den Endlagerstandort in Salz wahrgenommen wird. Das Wirtsgestein bezieht sich auf den Bereich, der an den ewG anschließt.

#### **Schritt 1:**

Das WG hat im Endlagersystem Schnittstellen zu den Systemkomponenten (SK) GU und ewG. Eine indirekte Verbindung könnte auch zum Schachtverschluss (SV) gegeben sein. Alle SK haben SF von denen wiederum einige in Beziehung zu der SF des Beispiels stehen. Die folgende Diskussion geht auf die möglichen Verbindungen der einzelnen SF auf die SF aus dem Beispiel ein:

Die Aufgabe des WG besteht u. a. darin, den ewG gegenüber physikalischen und chemischen Einwirkungen zur Erhaltung seiner Isolationseigenschaften langfristig zu schützen.

Die SF des WG sind sowohl auf den Schutz des ewG als auch auf die Rückhaltung einer möglichen Radionuklidfreisetzung ausgerichtet. Hinsichtlich der Rückhaltung von Radionuklidfreisetzungen ist bei den SF zwischen direkter und indirekter Zweckbestimmung zu unterscheiden. Die SF „SF\_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ wirkt hierbei indirekt auf eine Radionuklidrückhaltung, da mit der Verhinderung eines Lösungszutritts in den ewG eine der Voraussetzungen für eine daraus möglicherweise resultierende Freisetzung von Radionukliden entzogen wird. Damit trägt diese SF zum Integritätserhalt des ewG bei.

Neben dem WG wurde auch für den Schachtverschluss (SV) die SF „SF\_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ festgelegt. Auch hier trägt die SF indirekt zur Radionuklidrückhaltung und damit zum Integritätserhalt des ewG bei. Das gilt für den Fall, dass der SV eine Verbindung zum ewG hat (konzeptabhängig). Für die weiteren Ausführungen wird eine solche Verbindung unterstellt.

Beide SF (für die Systemkomponente WG und SV) wirken parallel einem Zutritt von Lösungen in den ewG entgegen. Für den ewG wurde ebenfalls die SF „SF\_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ festgelegt, die sich auf die indirekte Radionuklidfreisetzung durch die Verhinderung von Lösungszutritten zu den Abfallgebinden in den Einlagerungsbereichen bezieht. Unter der Bedingung, dass sich im ewG keine nennenswerten Lösungsmengen zum Zeitpunkt des Endlagerverschlusses befinden, wird die SF relevant, wenn Lösungszutritte über das WG und/ oder den Schachtverschluss in den ewG erfolgen. Die SF\_9 des ewG ist daher eine latente SF.

Die festgelegte SF „SF\_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ des WG nimmt eine zentrale Rolle ein, die sich durch die Verbindung mit weiteren SF des WG und wie oben beschrieben durch den Bezug zu den SF anderer SK äußert. So trägt die SF „SF\_4: Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen“ zum Schutz des WG selbst und des ewG z. B. vor einer möglichen Ausbildung von Wegsamkeiten und damit zum Vordringen von Lösungen/ Wässern bei. Weiterhin zielt die SF „SF\_8: Integritätserhalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion“ darauf ab, dass das WG durch seine Überdeckung bzw. Mächtigkeit den ewG vor möglichen ablaufenden Erosions- und Subrosionsprozessen schützt. Hier ist allerdings zu erwähnen, dass durchaus Phänomene wie die vorseilende Subrosion diskutiert wird /APP 06/, bei der eine Subrosion in angrenzenden weniger lösungsbestandigen Schichten zum WG stattfinden kann. Somit sind u. U. subrosive Vorgänge bis in den ewG nicht auszuschließen.

Zwischen SF\_9 und „SF\_10: Rückhaltung gasförmiger Radionuklide“ des WG besteht insofern eine Verbindung, als dass eine Freisetzung von flüchtigen Radionukliden auf mögliche Lösungszutritte vom WG zum ewG zurückzuführen sind. Ansonsten ist diese SF als relativ unabhängig zur SF „SF\_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ einzustufen. Desweiteren würde die SF\_10 nur relevant, wenn freigesetzte gasförmige Radionuklide aus dem ewG oder dem Schacht in das WG eindringen. D. h., dass die entsprechenden SF „SF\_10: Rückhaltung gasförmiger Radionuklide“, die durch den ewG und SV wahrgenommen werden, nicht greifen. Damit ist die SF\_10 des WG eine reine Reservefunktion. Gleiches gilt für die SF\_10 des SV. Die SF zur Rückhaltung von gasförmigen Radionukliden soll hier nicht näher diskutiert werden. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass eine Freisetzung von flüchtigen Radionukliden auch das Produkt eines Lösungszutrittes über den SV und weiterer Barrieren sein kann. Ferner ist eine Freisetzung von flüchtigen Radionukliden auch ohne Lösungszutritt denkbar.

Das betrifft z. B. die sog. Instant Release Fraction (IRF), die im Falle (anfänglich) defekter Behälter freigesetzt wird.

Die Abb. 5.7 zeigt schematisch die einzelnen SF, die mit der hier betrachteten SF „SF\_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ des WG in Verbindung stehen.

SF_ZUS_NR	Beschreibung der SF	Schutz (S) /Rückhaltung (R)	ES				GS
			SV	EL	WG	GU	
			SV	EWG	WG	GU	
1	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins	S	x				
3	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke, ggf. des Bentonitquelldrucks des Versatzes (Tonsteinkonzept))	S	x	x			
4	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	S		x	x	x	
5	Geomechanische Stabilisierung: Mechanischer Schutz der technischen Abdichtungen	S		x			
8	Integritätserschließung: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion	S			x	x	
9	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	R	x	x	x		
10	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	R	x	x	x		
12	Begrenzung des Radionuklidtransports durch geringe Permeabilität	R					x
13	Verdünnung von Radionuklidkonzentrationen durch Zumischung von nichtkontaminierten Grundwässern	R					x
15	Temperaturbegrenzung/Integritätserschließung: Schadhafte Aufnahme der Zerfallswärme	S		x			
17	Verzögerung der Radionuklidverbreitung durch Ausbildung einer mineralisationsbedingten Dichteschichtung	R					x
18	Verzögerung der Radionuklidverbreitung durch Kolloidfiltration	R					x
19	Verzögerung der Radionuklidverbreitung durch Sorption	R	x	x	x	x	

Abb. 5.7: Darstellung möglicher Beziehungen von weiteren Sicherheitsfunktionen (SF) „rote Markierung“ zu der SF 9 und der Systemkomponente Wirtsgestein (WG) „gelbe Markierung“

**Schritt 2:**

In der Abb. 5.8 sind die Verbindungen und Abhängigkeiten der einzelnen SF aus der Diskussion in Schritt 1 schematisch dargestellt. Die Pfeile einer Verbindung zeigen darin an, dass von der ausgehenden SK oder SF (Pfeilanfang) auf die entsprechende SK oder SF (Pfeilspitze) Einfluss genommen wird. Der Einfluss ist z. B. dadurch bedingt, dass die Sicherheitsfunktion von der jeweiligen SK nur unzureichend bzw. nicht mehr wahrgenommen wird. So bedeutet beispielsweise in Abb. 5.8, dass im Falle eines Ausfalls der SF\_9 des WG ein Lösungszutritt in den ewG gegeben ist. Das weitere

Fortschreiten der Lösung ist dann durch die SF\_9 des ewG zu begrenzen bzw. zu verzögern.

Unterstellt man z. B., dass die SF\_4 der GU ausfällt, dann wird dadurch die Anforderung an die SF\_4 des WG erhöht. Ist durch die Erhöhung, z. B. größere mechanische Beanspruchung, auch der Ausfall der SF\_4 des WG davon betroffen, dann hat das möglicherweise einen Einfluss auf die SF\_9 des WG und auf die SF\_4 des ewG.

Zudem ist eine Wechselbeziehung (siehe Doppelpfeil in Abb. 5.8) zwischen den beiden Systemkomponenten WG und SV bzw. des Schachtes denkbar. Die Wechselbeziehung besteht darin, dass Lösungen aus dem WG in den Schacht gelangen und damit auf den SV wirken können. Auch der umgekehrte Weg ist vorstellbar, dass im Schacht vorliegende Lösungen/ Wässer über die Auflockerungszone oder mögliche Risse in das WG gelangen.

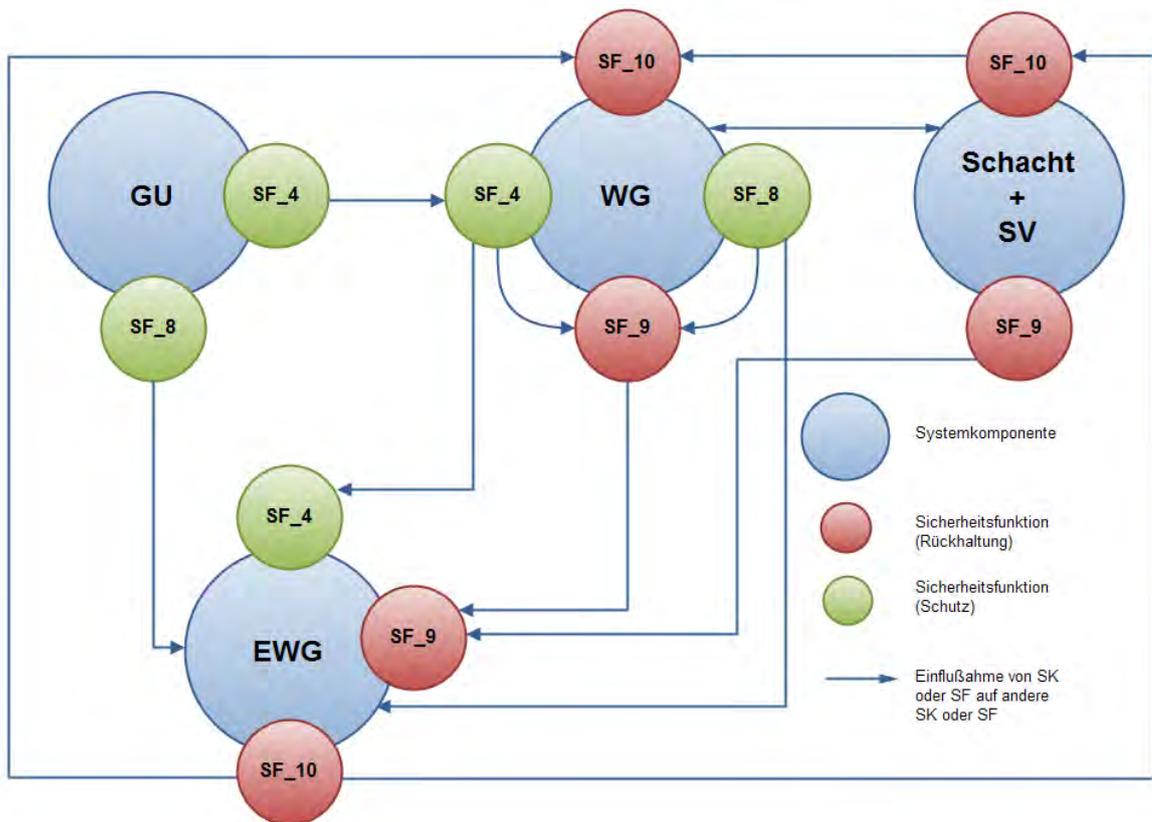


Abb. 5.8: Schematische Darstellung verschiedener Systemkomponenten und ihrer Sicherheitsfunktionen sowie deren Verbindung und Einflussnahme untereinander

Das Ergebnis der Einflussbetrachtung aus Abb. 5.8 zeigt in aufbereiteter Form die Abb. 5.9, in der die SK und die entsprechenden SF dazu in einer quadratischen Matrix als Elemente enthalten sind. Ausgehend von der Spalte A und B ist dann die Einflussnahme der SK und der SF gemäß des farbigen Eintrages in den Zellen der Matrix abzulesen.

Ein Beispiel soll den o. g. Zusammenhang näher erläutern:

Ausgangspunkt ist die Systemkomponente WG in Spalte A und die SF\_8 in Spalte B, deren Einflussnahme z. B. entlang der Zeile 4 entnommen werden kann. Der erste Eintrag ist in Spalte G markiert (schraffiert), der die Einflussnahme der SF\_8 auf die SF\_9 des WG kennzeichnet. Die Einflussnahme ist darauf zurückzuführen, dass bei einem Ausfall der SF\_8 neben der Erosion auch die Subrosion auf das WG einwirken. Eine Subrosion bedeutet jedoch das Salz gelöst wird und damit Wegsamkeiten generiert werden und das Lösung/Wässer im WG vorliegen, die wiederum auf die SF\_9 einen Einfluss haben. Weitere Einträge entlang der Zeile 4 enthalten die Spalten I bis M, wobei die Spalten I und J (blau) die Einflussnahme des WG auf den SV (siehe o. g. Wechselbeziehung) und die Spalte K, L und M (grün) die Einflussnahme der SF\_8 auf den ewG anzeigen. Bei Ausfall der SF\_8 ist aufgrund der Anforderung an die SF, nämlich der Schutz vor Erosion und Subrosion, ein direkter Einfluss auf den ewG gegeben.

Alle weiteren Einträge in der Matrix lassen sich analog des Beispiels ermitteln. Die Bedeutung der unterschiedlichen farblichen Markierung in der Matrix ist der Legende in Abb. 5.9 zu entnehmen.

		Spalte												
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Zeile	SK	GU			WG				SV		EWG			
	SF	4	8	4	8	9	10	9	10	4	9	10		
1	GU	4												
2		8												
3		4												
4	WG	8												
5		9												
6		10												
7	SV	9												
8		10												
9		4												
10	EWG	9												
11		10												

Abb. 5.9: Darstellung der möglichen Einflussnahme von Systemkomponenten (SK) und Sicherheitsfunktionen (SF) auf andere in Verbindung stehende SK und SF

### **Schritt 3:**

Der dritte Schritt beinhaltet die Einbeziehung der Wirkungszeiträume der in Verbindung zueinander stehenden SF. Hieraus lässt sich ggf. ableiten, in welchem Zeitraum latente oder in Reserve stehende SF ihre Funktion aufnehmen und/ oder abhängige SF durch den möglichen Ausfall von anderen SF einer höheren Anforderung, Belastung usw. ausgesetzt sind.

Für die Betrachtung von Wirkungszeiträumen werden insgesamt vier Zeitphasen berücksichtigt, die bereits als Bezugsphasen zur Darstellung der erwarteten Entwicklung (s. Kapitel 4) festgelegt wurden. Darüber hinaus lassen sich die Wirkungszeiträume weitgehend aus den Betrachtungen der erwarteten Entwicklung ableiten.

Die auf das WG und den ewG bezogenen SF gelten für den gesamten Nachweiszeitraum, d. h. vom Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagers bis eine Million Jahre danach.

Für den SV wird eine Standzeit von 10.000 Jahren zugrunde gelegt, womit auch die Wirkungszeiträume der SF des SV begrenzt sind. Nach diesem Zeitraum wird angenommen, dass das Salz im Endlagersystem soweit konvergiert ist, dass die einlagerungs- und konzeptbedingten Auffahrungen nahezu die Eigenschaften ihrer Umgebung angenommen haben. D. h., bei Erreichen dieses Zustandes ist das Vorliegen eines intakten SV nicht mehr zwingend notwendig, um die Sicherheit des Endlagersystems zu gewährleisten.

Die Wirkungszeiträume der SF für die GU sind auf diejenigen Phasen begrenzt, in denen keine geomorphologischen und tiefgreifende Prozesse zu erwarten sind, die die Oberfläche und das Deck- und Nebengebirge in seinen Ausmaßen und Eigenschaften erheblich verändern. Mit erheblichen Änderungen der Geomorphologie und des Deck- und Nebengebirges eines Salzstockes ist z. B. mit dem Eintreten und dem Rückzug einer vollständigen Inlandvereisung auszugehen. Verschiedenen wissenschaftlichen Einschätzungen zufolge ist mit derartigen glazialen Bedingungen frühestens in der Phase 3 zu rechnen /KEL 09/. D. h., dass die Wirkungszeiträume der SF der GU für die Phase 1 und 2 anzusetzen sind und von einer Einschränkung bzw. Ausfall der SF ab Phase 3 auszugehen ist.

Die Wirkungszeiträume der SF über die verschiedenen SK zeigt die Abb. 5.10.

SF_ZUS_NR	Beschreibung der Sicherheitsfunktion	SK	Wirkungszeitraum			
			Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
			0 - 10.000 a	10.000 - 50.000 a	50.000 - 150.000 a	150.000 - 1.000.000 a
4	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	GU				
		WG				
		EWG				
8	Integritätsverlust: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion	GU				
		WG				
9	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	WG				
		EWG				
		SV				
10	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	WG				
		EWG				
		SV				

Abb. 5.10: Darstellung der Wirkungszeiträume „blaue Markierung“ entlang der eingeteilten Zeitphasen zu den in Beziehung stehenden SF

Bezogen auf die zu untersuchende SF\_9 des WG unter Einbeziehung der Wirkungszeiträume von Einfluss nehmenden SF ist folgendes festzustellen:

Eine indirekte Einflussnahme auf die SF\_9 des WG ist durch die SF\_4 und SF\_8 der GU und des WG selbst denkbar. So könnte das WG bei Verlust des Deckgebirges als Bestandteil der GU ab Phase 3 einer höheren Belastung z. B. durch Erosion, Subrosion usw. ausgesetzt sein, das sich wiederum nachteilig auf die SF\_9 auswirkt. Zu diesem Zeitpunkt sind jedoch nach der erwarteten Entwicklung die vom Endlager und Abfall induzierten transienten Vorgänge längst abgeschlossen, wie z. B. Temperaturentwicklung und Konvergenzvorgänge im Endlagersystem.

In Bezug auf die SF\_9 des ewG als latente SF ist ein Ausfall der SF\_9 des SV in der Phase 2 nicht kritisch zu bewerten, da auch zu diesem Zeitpunkt davon ausgegangen wird, dass die transienten Vorgänge abgeschlossen sind und das umgebende Salzgestein sowie der eingebrachte Versatz in den Einlagerungsbereichen nahezu die Eigenschaften des intakten Wirtsgestein aufweisen.

Der Verlust der SF\_10 des SV in der Phase 2 ist ebenfalls als unterkritisch zu bewerten, da diese SF analog zur SF\_10 des WG ohnehin nur als Reservefunktion in Erscheinung treten würde. D. h., wenn der ewG nicht erwartungsgemäß seine Anforderung erfüllt und in diesem Falle ein Übergang von gasförmigen Radionukliden durch den SV erfolgt.

## 6 Szenarien

Die Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle ist im so genannten Langzeitsicherheitsnachweis zu erbringen. Hierzu werden mögliche Entwicklungen des Endlagersystems (Szenarien) hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Sicherheit untersucht. Die Ableitung von Szenarien ist für den Sicherheitsnachweis von essenzieller Bedeutung und erfolgt in der Szenarientwicklung /ATW 08/.

Der Begriff Szenarium ist nach /GRS 07/ wie folgt definiert:

„Ein Szenarium beschreibt eine postulierte Entwicklung des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen, die durch eine Kombination relevanter Faktoren spezifiziert ist, welche das Endlagersystem charakterisieren oder dieses beeinflussen.“

Die Ableitung von Szenarien erfolgt wie bereits oben ausgeführt in der Szenarientwicklung, die in Anlehnung nach /NEA 92/ folgendermaßen beschrieben wird:

Die Szenarientwicklung beinhaltet die Identifizierung, Ableitung und ausführliche Beschreibung von potenziellen Entwicklungen (Szenarien), die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle relevant sind.

Hinsichtlich der unterschiedlichen aufgestellten Szenarien in den verschiedenen Ländern, lässt sich im Prinzip eine generelle Übereinstimmung ausmachen, die von einem Referenzszenario ausgeht, dass die erwartete (normale, wahrscheinliche) Entwicklung am Standort und des Endlagersystems zugrundelegt. Darüber hinaus werden alternative Szenarien betrachtet, die von weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ausgehen. Auch in diesem Vorhaben wurde die erwartete Entwicklung beschrieben (Kapitel 4). Die Vorgehensweise zur Ableitung von alternativen Szenarien wird im Kapitel 6.2 dargestellt.

Nach /GRS 07/ wird folgende Unterscheidung von Szenarien unter Einbeziehung der Eintrittswahrscheinlichkeit vorgeschlagen:

- „wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren eine hohe Wahrscheinlichkeit zuzuordnen ist,

- weniger wahrscheinliche Szenarien: Szenarien, deren Eintreten im Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren eine wesentlich geringere Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist als den wahrscheinlichen Szenarien,
- nicht weiter zu betrachtende Szenarien: Szenarien, deren Eintreten eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen ist oder bei denen die primären Auswirkungen des auslösenden Ereignisses die Sekundärfolgen durch das Endlager bei weitem übersteigen, wie etwa der Einschlag eines großen Meteoriten.“

Hinsichtlich der Einteilung von Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen wird in diesem Vorhaben dem obigen Vorschlag gefolgt /GRS 07/.

Im Rahmen des Vorhabens 3607R02580 wird durch die methodische Vorgehensweise zur Ableitung von standortspezifischen Szenarien die Basis für langzeitsicherheitsanalytische Betrachtungen gebildet. Darüber hinaus wird durch die Ausweisung von Sicherheitsfunktionen und der darauf Einfluss nehmenden FEP eine der grundlegenden Elemente für die Entwicklung einer Vergleichsmethodik im Vorhaben 3607R02589 geschaffen.

## **6.1 Rahmenbedingungen und Festlegungen**

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen zu dem Vorhaben 3607R02580 die bereits vor dem Beginn des Vorhabens vorlagen und Festlegungen, die im Rahmen von vorhabenbegleitenden Projektgesprächen bzw. Fachgesprächen und Workshops getroffen worden sind, benannt. Die Rahmenbedingungen und Festlegungen haben einen unmittelbaren Einfluss auf die Ableitung von Szenarien und damit auf die zu betrachtenden Entwicklungen der Endlagersysteme.

### **Rahmenbedingungen**

Für das Forschungsvorhaben 3607R02580 sind folgende Rahmenbedingungen aufgestellt worden, die den Arbeitsumfang abstecken bzw. mitbestimmen:

- Szenarien des beabsichtigten und unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager sind nicht zu untersuchen.
- Für die Szenarientwicklung ist der Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre zugrunde zu legen.

- Szenarien für die Störfallanalyse oder für die Analyse des bestimmungsgemäßen Betriebs (Betriebsphase, Verschlussphase) sind nicht aufzustellen.
- Die Rückholbarkeit der Abfälle als Option ist nicht zu unterstellen.

### **Festlegungen**

Folgende Phänomene und Szenarien sind im Vorhaben VerSi nicht zu berücksichtigen /VER 08b/:

- Eine unentdeckte hydraulisch wirksame Diskontinuität im ewG eines Tonsteinstandortes wird als unwahrscheinliches Szenario angesehen. Es erfolgt daher keine Betrachtung als Alternativszenario.
- Eine hydraulisch wirksame Diskontinuität wird im Staßfurt-Steinsalz (ewG) des Salzstandortes Gorleben mit Sicherheit ausgeschlossen.
- Es wird kein Anhydritszenarium unterstellt, da im Steinsalz der Staßfurt-Serie ein entsprechender Abstand zu den Anhydrit- und Gorlebenbänken eingehalten werden kann (min. 50 m). Weiterhin zeigen die bisherigen untertägigen Befunde, dass die Anhydritblöcke nicht zusammenhängen, sondern in plastischem Salz eingebettet sind. Entsprechende Lösungseinschlüsse weisen nur lithostatischen Druck auf und sind ohne hydraulischen Kontakt zum Deckgebirge.
- Eine Migration von Lauge aus den Laugentaschen der Anhydritbänke in Richtung der eingelagerten Abfälle wird nicht betrachtet.
- Kryogene Risse werden für keinen Standort betrachtet. Es bestehen Zweifel an der Existenz von kryogenen Rissen in größerer Teufe.
- Frost-Tauwechsel sind nur auf wenige Meter der obersten Schicht begrenzt. Der oberste Schachtverschluss liegt jedoch für beide Standorte in einer Teufe, bei der eine Einflussnahme nicht zu besorgen ist.
- Inlandvereisung in randlicher Lage wird nicht unterstellt.
- Salzkonzentration: Thermisch induzierte Migration wird für VerSi nicht unterstellt.

## **Weitere Festlegungen aus Fachsitzungen**

- Tonkonzept: Die Grenztemperatur von 95 °C am Übergang zwischen Bentonitverfüllung und WG muss eingehalten werden.
- Es werden Eisüberfahung und Rinnenbildung für beide Standorte berücksichtigt.
- Tonstandort: Es wird eine Rinne wie in Gorleben (250 m) unterstellt.
- Es werden 700 m Eisüberdeckung und 200 m Permafrosttiefe unterstellt.
- Rinnenbildung mit Erosionstiefen bis 250 m unter GOK wird als wahrscheinliche Entwicklung angenommen. Rinnenbildung mit Erosionstiefen von 250 m bis 350 m unter GOK werden als weniger wahrscheinliche Ereignisse betrachtet. Tiefer gehende Erosionen werden für VerSi nicht betrachtet.
- Salz: Die CSD-V und CSD-C haben eine Standzeit bis zum Abschluss der Konvergenz.
- Tonstandort: Die obere Grenze des ewG liegt bei -340 m und die untere Grenze bei -560 m.
- Salzstandort: Die Sicherheitsabstände im Hauptsalz um die Einlagerungsbereiche von jeweils 50 m werden als ewG definiert.
- Salzstandort: Die Grenze des ewG schneidet die Strecken im Infrastrukturbereich unmittelbar hinter den Streckenabdichtungen.
- What if Fälle werden nicht betrachtet.
- Unter Verwendung einer Asphaltlage oberhalb oder unterhalb der Bentonitabdichtung wird im Projekt VerSi von einer sofortigen Wirkung der Schachtabdichtung ausgegangen.

## **6.2 Ableitung von Szenarien**

Das angestrebte Ziel in diesem Vorhaben ist wie bereits beschrieben, die Erarbeitung einer systematischen Methodik zur Ableitung von Szenarien nach der in Kapitel 2 ausgeführten Vorgehensweise zur Szenarientwicklung. Die Ableitung von Szenarien wird beispielhaft in Bezug auf Sicherheitsfunktionen auf der Basis der dem Vorhaben zugrunde liegenden Rahmenbedingungen und getroffenen Festlegungen in Fachdiskussionen, der in Kapitel 3 beschriebenen Datengrundlagen, der Beschreibung der

erwarteten Entwicklung der Endlagersysteme (Kapitel 4) sowie der Ergebnisse der Funktionsanalyse (Kapitel 5) unter Einbeziehung konzeptspezifischer und standortspezifischer Gegebenheiten demonstriert.

Mit einem Szenario ist eine Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems und dem Standort verbunden, die zu einer Radionuklidfreisetzung führen bzw. beitragen kann. Der für eine Radionuklidfreisetzung notwendige Stofftransport ist dahingehend zu hinterfragen, ob die dafür erforderlichen Bedingungen erfüllt sind. Zur Initiierung bzw. Aufrechterhaltung eines Stofftransportes müssen folgende Bedingungen vorliegen:

- Transportpfad (Kluft, Riss, hydraulisch wirksame Diskontinuität, zusammenhängende Porenräume usw.),
- Transportmedium (Flüssigkeit, Gas, Kolloid),
- Transportierbare Substanz (Radionuklid, Schadstoff) und
- Gradient (Druckdifferenz, Temperaturgefälle, Konzentrationsgefälle usw.).

Ein Radionuklidtransport vom Einlagerungsbereich über die Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) bedingt eine Reihe von Voraussetzungen, die für einen solchen Ablaufprozess erfüllt sein müssen. Die grundlegenden Bedingungen für einen Transport sind bereits benannt worden. Darüber hinaus ist vor allem das Vorliegen von ausreichenden Lösungsmengen eine für den Salzstandort notwendige Bedingung, die eine Freisetzung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen erst ermöglichen und zum Transport dieser Radionuklide beitragen. Mit dem Vorhandensein bzw. Zutreten von Lösungen werden eine Reihe weiterer Prozesse in Gang gebracht, wie Auflösungs- und Umlösungsprozesse, Veränderung des Chemismus, Korrosion etc.

Ist die eigentliche Voraussetzung eines Zutrittes von ausreichenden Lösungsmengen in die Einlagerungsbereiche erfüllt, dann können u. U. eine Reihe weiterer Mechanismen dazu beitragen, den Auflösungsprozess der Gebinde, die Aufnahme der Nuklide und den Transport zu beschleunigen bzw. den Transportpfad und die Transportzeit zu verkürzen.

In Bezug auf die demonstrative Ableitung von Szenarien wird das in der Funktionsanalyse diskutierte Beispiel zur Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“ herangezogen und an den konzeptspezifischen und standort-

spezifischen Merkmalen des hier zugrundeliegenden Salzstandortes gespiegelt. Die genannte Sicherheitsfunktion ist durch die Systemkomponente Wirtsgestein (WG) wahrzunehmen, wobei mit Wirtsgestein der angrenzende Bereich zum ewG gemeint ist.

In Kapitel 5.2 werden folgende Bedingungen genannt, die im Zusammenhang mit einem Lösungszutritt und der hier zugrundeliegenden SF im Hinblick auf eine Freisetzung von Radionukliden zu betrachten sind:

- a) Die Systemkomponenten WG und ewG müssen vorhanden sein,
- b) im WG müssen ausreichende Wässer/Lösungen vorliegen und
- c) für einen Zutritt von Wässer/Lösungen muss ein Stofftransport erfolgen.

Zu a)

Die erste Bedingung ist durch das Sicherheitskonzept und die konzeptionelle Festlegung der Grenzen des ewG im Salzstock gegeben. So wird im Sicherheitskonzept zum Salzstandort /GRS 09/ eine hohe Mächtigkeit der hangenden Salzsichten zum Schutz des ewG vor Subrosionsprozessen gefordert. Demnach hat das Endlagerbergwerk eine ausreichend mächtige Überdeckung durch hangende Salzsichten aufzuweisen. Die Grenzen des ewG lassen sich gemäß der getroffenen Festlegungen in Kapitel 6.1 und der Darstellung in /GRS 09/ wie folgt beschreiben:

Der ewG liegt vollständig im Steinsalz, wobei Sicherheitsabstände im Hauptsalz um die Einlagerungsbereiche von 50 m zugrundegelegt werden. Die Außengrenze des ewG im Endlagerbergwerk befindet sich am äußeren Ende der Streckenabdichtungen in den Richtstrecken. D. h., die Grenze des ewG schneidet die Strecken im Infrastrukturbereich unmittelbar hinter den Streckenabdichtungen der Richtstrecken.

Aus der geplanten Endlagerteufe von 870 m, den festgelegten Sicherheitsabständen von 50 m und einer Teufe des Salzspiegels von 250 m wird deutlich, dass wie im Sicherheitskonzept gefordert eine hohe Mächtigkeit der hangenden Salzsichten (> 500 m) gegeben ist.

Zu b)

Die weitere Bedingung bzw. eingangs erwähnte Notwendigkeit ausreichender Lösungsmengen für eine Initiierung des Radionuklidtransportes führt zu der Fragestellung nach möglichen Quellen für Lösungen bzw. Wässern, die bereits in der Funktionsanalyse (Kapitel 5.2 Schritt 2 und 3) identifiziert und allgemein diskutiert wurden.

Im Folgenden sind die wesentlichen Quellen benannt, die als Transportmedium für einen Radionuklidtransport zu diskutieren sind:

- Wasser aus dem Deckgebirge bzw. Nebengebirge,
  - aus dem zerblockten Hauptanhydrit und dem sekundären Steinsalz in Störungszonen im Grenzbereich zwischen der Staßfurt- und Leine-Folge sind Zuflüsse mit bis zu 100 m<sup>3</sup> abgeschätzt worden (/BOR 08/ S. 183),
- natürlich vorkommendes Wasser im Steinsalz,
  - der Wassergehalt des Hauptsalzes im Salzstock Gorleben beträgt 0,012 – 0,017 Gew.-% nach Messungen an Proben aus dem Erkundungsbereich /BOR 08/,
- natürlich vorkommendes Wasser in Salzgrus,
  - für VerSi wird davon ausgegangen, dass ausschließlich getrockneter Salzgrusversatz mit einer Feuchte von maximal 0,1 Gew.-% verwendet wird /GRS 09/,
- gebundenes Wasser (Kristallwasser) im Salz (Steinsalz, Salzgrus),
  - Kristallwasser im Salz wird erst bei deutlichen höheren Temperaturen als die angestrebte Maximaltemperatur von 200 °C freigesetzt,
- vorliegende Lösungsvorkommen,
  - Untersuchungen des BfS ergeben linear interpoliert ein mögliches Lösungsvolumen von ca. 1.000 m<sup>3</sup> im Hauptanhydrit in einem 200 m Umkreis um den Infrastrukturbereich. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten wurde das Lösungsvolumen unter Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors von 12,5 auf 12.500 m<sup>3</sup> abgeschätzt /BfS 08/,

- Volumen der bisher angetroffenen Reservoirs an Lösungen bzw. Gasen betragen wenige cm<sup>3</sup> bis einige hundert m<sup>3</sup> /BGR 02/,
- im Hauptsalz des Salzstock Gorlebens wurden keine nennenswerten Mengen an Lösungen (und Gase) nachgewiesen (/BOR 08/, S. 175)
- verwendete Wässer z. B. zur Auffahrung und Verfüllung von Strecken oder Niederbringung von Bohrlöchern,
- zusätzliches Wasser, das bei der Einbringung des Versatzmaterials zur Staubreduzierung eingesetzt wird (Die im Grubengebäude geschaffenen Hohlräume werden bei der Schließung des Endlagers, bzw. einzelner Einlagerungsfelder versetzt. Für die Einlagerungsstrecken für Polluxbehälter ist dabei ein Schleuder- und bei den sonstigen Strecken ein Blas- oder Schüttversatz mit Salzgrus vorgesehen. Der Salzgrusversatz weist einen anfänglichen Porenanteil von 35% auf.) /GRS 8f/,
- gebundenes Wasser in Zement bzw. Beton z. B. zum Ausbau der Grube,
  - spielt nur im Infrastrukturbereich eine Rolle,
- Betriebswässer,
  - es wird davon ausgegangen, dass anfallende Betriebswässer gesammelt und nach über Tage verbracht werden. (Informationen über anfallende bzw. erwartete Mengen liegen nicht vor.),
  - anfallendes Wasser bzw. Feuchte aus der Bewetterung der Grube und
- Injektion von Lösungen bzw. Fluiden durch menschliche Aktivitäten nach Verschluss des Endlagers.

Im Prinzip können die genannten Quellen nach den in Abbildung 6.1 dargestellten Kategorien eingeteilt werden. Die möglichen Quellen werden im Folgenden geordnet nach den Kategorien hinsichtlich ihrer Relevanz für den hier betrachteten Salzstandort diskutiert:

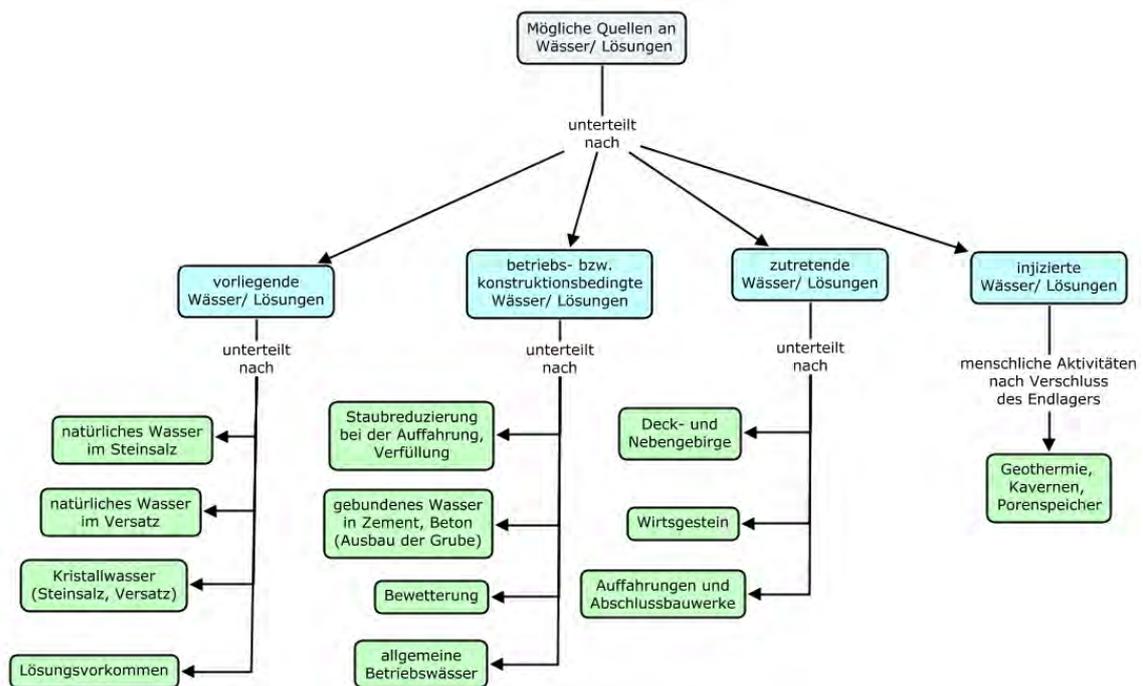


Abb. 6.1: Mögliche Quellen an Lösungen/ Wässern in Bezug auf das Endlagersystem in Salz und deren Einteilung in Kategorien

Kategorie: Vorliegende Wässer/ Lösungen

Aus den eingangs dargelegten Anteilen von Wasser im Salz und im Salzgrus sowie die geringen Lösungsmengen im Hauptsalz und unmittelbaren Einzugsbereich der Einlagerungsfelder wird deutlich, dass diese Mengen zu gering sind, um nennenswerte Korrosion an den Behältern zu induzieren. Somit werden auch die anfallenden korrosionsbedingten Gasmengen gering ausfallen. Die Korrosion von Behältern verursacht durch vorhandene Wässer/ Lösungen wird vermutlich aufgrund des begrenzten Angebotes relativ rasch zum Erliegen kommen.

Nennenswerte unentdeckte Lösungsmengen im Hauptsalz werden durch die zu erwartende umfassende Standortuntersuchung mit hohen Qualitätssicherungsansprüchen ausgeschlossen.

Kategorie: Betriebs- und konstruktionsbedingte Wässer/ Lösungen

Konkrete Informationen über anfallende bzw. erwartete Mengen liegen nicht vor. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass anfallende Betriebswässer gesammelt und nach über Tage verbracht werden. Eingebraachte Wässer zur Staubreduzierung werden zum

Teil mit dem anfallenden Haufwerk nach über Tage verbracht. Ein weiterer Teil kann über die Bewetterung abgeführt werden. Wässer, die zum Verfüllen von Strecken dem Versatz beigemischt werden, können nur bedingt über die Bewetterung abgeführt werden. Hier ist unklar, ob nach jetzigem Planungsstand in der Versatztechnik Wasser zur Reduzierung der Staubentwicklung vorgesehen ist bzw. eingesetzt werden soll. In VerSi wird davon ausgegangen, dass der Versatz trocken eingebracht wird. Damit sind vermutlich auch die Mengen an Betriebswässer zu gering, um einen nennenswerten Beitrag zur Korrosion zu leisten.

#### Kategorie: Zutretende Wässer/ Lösungen

Zutretende Wässer/ Lösungen aus dem Deck- und Nebengebirge bzw. über den Schacht in das Endlagersystem können nicht ausgeschlossen werden. Darüber hinaus können zutretende Wässer/ Lösungen in Bezug auf die Menge signifikant sein.

#### Kategorie: Injizierte Wässer/ Lösungen

Injizierte Wässer/ Lösungen aus menschlichen Aktivitäten können aus der Sicht heutiger Technik und Praxis in Bezug auf ihre Menge bedeutsam sein. Die menschlichen Aktivitäten sind jedoch in VerSi nicht Gegenstand der Betrachtungen.

#### Resümee

Den o. g. Ausführungen zufolge liefert in VerSi für den Salzstandort nur die Quelle bzw. Kategorie zutretende Wässer/ Lösungen ein entscheidendes Potenzial für einen Radionuklidtransport. Bezogen auf die zu betrachtende SF „Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“ sind hierbei zutretende Wässer/ Lösungen in das WG gemeint.

Zu c)

Die letztgenannte Bedingung für einen Zutritt von Wasser /Lösungen aus dem WG in den ewG bezieht sich auf den Stofftransport. In der Funktionsanalyse (siehe Kapitel 5.2 Schritt 2 und 3) wurden verschiedene Mechanismen diskutiert, die für einen Transport von Wasser/ Lösungen in Frage kommen. Die diskutierten Prozesse bezogen sich auf die Diffusion, Thermomigration und Advektion.

Zur Diffusion wurde ausgeführt, dass dieser Prozess in Salz nur dann eine Rolle spielen kann, wenn im Gesteinsverband über größere Bereiche Inhomogenitäten vorliegen. Ansonsten ist aufgrund der geringen Permeabilität des festen Steinsalzes ein Transport durch Diffusion vernachlässigbar.

Das Hauptsalz ist nach /BOR 08/ weitestgehend homogenisiert. Ferner weist das Salzgestein keine Permeabilitäten größer als  $10^{-21}$  m<sup>2</sup> auf. Damit ist das Steinsalz nahezu undurchlässig gegenüber Fluiden. Aus den genannten Gründen wird die Diffusion als Transportprozess von Lösungen aus dem WG zum ewG nicht weiter berücksichtigt.

Die Thermomigration gewinnt an Bedeutung bei Vorliegen von Lösungen in der näheren Umgebung der Einlagerungsbereiche und bei hohen Temperaturgradienten. Beide Merkmale sind bezogen auf die hier zu betrachtende SF und dem Abstand des WG zu den Einlagerungsbereichen wenig ausgeprägt bzw. unbedeutend. In Bezug auf den genannten Umstand sowie die Beachtung der Festlegung (siehe Kapitel 6.1), dass eine thermisch induzierte Migration für VerSi nicht zu unterstellen ist, wird der Prozess der Thermomigration nicht weiter berücksichtigt.

Ein möglicher advektiver Transport bedingt das Vorhandensein von durchströmbaren Wegsamkeiten. In diesem Zusammenhang wurde in der Funktionsanalyse (Kapitel 5.2, Schritt 3) die Möglichkeit von bereits vorliegenden und zukünftigen Wegsamkeiten wie Risse, Klüfte, hydraulisch wirksame Diskontinuitäten diskutiert.

Hinsichtlich vorliegender Wegsamkeiten wurde die Unterscheidung nach bekannten und unentdeckten Klüften, Rissen usw. vorgenommen.

Nach /BOR 08/ sind im Salzgestein natürlich entstandene Klüfte oder Störungen generell zu finden. Diese Klüfte bzw. Störungen sind in der Regel durch Neubildungen von Salzmineralien verheilt und geschlossen und stellen in dieser Ausprägung keine pas-

sierbaren Wegsamkeiten für Wässer/ Lösungen dar. Für den hier betrachteten Salzstandort konnten im Rahmen der Erkundungsarbeiten offene lösungserfüllte Klüfte während der Schacht- und Streckenauffahrungen direkt oder indirekt durch zulaufende Lösungen in Bohrungen nachgewiesen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass von einem räumlich begrenzten Kluftsystem auszugehen ist, da sich die angetroffenen Lösungsmengen bzw. Lösungszuflüsse mit der Zeit deutlich verringert haben oder ganz versiegten. Darüber hinaus sind flach einfallende Klüfte in der Nähe des Salzspiegels bekannt, die auf den Rückzug von Eismassen und der damit verbundenen Entlastung des Gebietes zurückgeführt werden.

Die Charakterisierung des Kluftinventars weist entweder schichtparallele oder die Schichtung in einem Winkel schneidende Klüfte aus. Hinsichtlich der Kluftgeometrien die von Materialeigenschaften und der Beanspruchung der Salzgesteine abhängen, werden Kluftweiten von Millimeter bis Metergröße und Kluftlängen von Dezimeter- bis Zehnermeter-Bereich angegeben. Die Kluftabstände schwanken unregelmäßig und folgen keiner Systematik oder erkennbaren Abhängigkeiten. Für das Hauptsalz wurden im Kernbereich und damit im geplanten Einlagerungshorizont keine Klüfte nachgewiesen /BOR 08/.

Nach den Festlegungen in Kapitel 6.1 wird eine hydraulisch wirksame Diskontinuität im Staßfurt-Steinsalz (ewG) des Salzstandortes Gorleben mit Sicherheit ausgeschlossen. Für das angrenzende WG ist eine solche Diskontinuität im Bereich des ewG sehr unwahrscheinlich. Es ist jedoch nach der Funktionsanalyse nicht auszuschließen, dass zu den bereits bekannten weitere unentdeckte Klüfte, Risse usw. am Salzstandort vorliegen. Ein daraus abzuleitendes zusammenhängendes Kluftsystem, das den Transport von Lösungen aus dem WG in den ewG ermöglicht, wird jedoch für unwahrscheinlich erachtet. Die Einschätzung erfolgt aus der Betrachtung, dass mögliche unentdeckte Klüfte sich in ihrer Ausprägung nicht signifikant von den bisher identifizierten Klüften unterscheiden werden. Damit ist z. B. verbunden, dass bisher keine Klüfte im Kernbereich des Hauptsalzes aufgefunden wurden, die Kluftlängen in anderen Salzgesteinen sich maximal im Zehnermeter-Bereich bewegen und weitgehend isoliert und räumlich begrenzt vorliegen, eine Verheilung der meisten Klüfte stattgefunden hat und dieser Prozess in geologischen Zeiträumen relativ kurzfristig abzulaufen scheint.

Neben den bisherigen Ausführungen, die sich auf bereits bestehende Klüfte, Risse usw. beziehen sind in der Funktionsanalyse (Kapitel 5.2, Schritt 3) auch Möglichkeiten der Generierung bzw. Reaktivierung von Wegsamkeiten nach Verschluss des Endla-

gers diskutiert worden. Die wesentlichen betrachteten Möglichkeiten bzw. Mechanismen aus der Funktionsanalyse, die im Kontext der hier zu betrachtenden SF primär auf Spannungsänderungen abzielen, sind im Folgenden zusammengestellt:

- Kaltzeiten
  - Permafrost
  - Kryogene Effekte
  - Vollständige Inlandeisüberfahung (Druckbelastung und Entlastung)
  - Rinnenbildung
  - Auslösung von lokal begrenzten seismischen Aktivitäten
- Hebungs- und Absenkungsprozesse
- Halokinese
- Endlager- und abfallinduzierte Mechanismen
  - Erkundungs-, konstruktions- und betriebsbedingte Aktivitäten
  - Wärme entwickelnder Abfall

Aus der obigen Aufstellung ist erkennbar, dass sich die Mehrzahl der Mechanismen unter der Thematik Kaltzeiten vereinen. Jeder aufgeführte Mechanismus aus obiger Liste kann jedoch zu einer Kluft- bzw. Rissbildung im Salzgestein führen. Unter Einbeziehung der Festlegungen (Kapitel 6.1) und der standortspezifischen Gegebenheiten ergibt sich für eine weitere Berücksichtigung folgendes Bild:

### **Kaltzeiten:**

Vor etwa 2,6 Millionen Jahren hat ein Wechsel des Klimaverlaufes stattgefunden, der mit rasch aufeinander folgenden Klimaschwankungen verbunden war. Das Klima veränderte sich in zyklischer Folge von Kaltzeiten und Warmzeiten womit auch eine Änderung der Eis- Wasser-Bilanz auf der Erde einherging. Infolge der Kaltzeiten setzten Vereisungen im arktischen Bereich ein. Während des Quartärs schoben sich mächtige Eismassen über Skandinavien bis in den heutigen norddeutschen Raum vor. Zu nennen sind hier die Elster-Kaltzeit, Saale-Kaltzeit und Weichsel-Kaltzeit.

Die Kaltzeiten waren hinsichtlich der randlichen Lage unterschiedlich weit fortgeschritten. Zudem waren die Auswirkungen dieser Kaltzeiten in Bezug auf ihre Erosionswirkung unterschiedlich intensiv. So bildeten Schmelzwässer eine Vielzahl von Abflussrinnen. Insbesondere die aus der Elster-Kaltzeit resultierenden Rinnen zeigen z. T. eine erhebliche Tiefenwirkung. Auch der hier betrachtete Salzstandort weist eine solche Rinnenstruktur aus der Elster-Kaltzeit auf, die in nordöstlicher Richtung über den Salzstock verläuft. Die Rinne reicht in ihrer Tiefenlage bis zum Salzspiegel. Dieser Bereich ist durch Sedimente des Quartärs überdeckt /BFS 07/.

Das Auftreten von Kaltzeiten am Salzstandort wird für wahrscheinlich angesehen. Mit einem ersten Auftreten einer Kaltzeit ist in der Phase 3 (50.000 – 150.000 a) zu rechnen. Diese Betrachtungen entsprechen auch den Ausführungen zur erwarteten Entwicklung zum Salzstandort (s. Kapitel 4).

Eine Einschätzung der zeitlichen Phasen einer zukünftigen Eisüberfahrung in Norddeutschland ist nachfolgend aufgeführt /KEL 09/:

- Aufbau eines Inlandeisgletschers beträgt mehrere 10.000 a und wird dabei unterbrochen durch zwischeneiszeitliche Erwärmungen.
- Eisüberdeckung von weiten Teilen Norddeutschlands nimmt einen Zeitraum von ca. 20.000 a – 40.000 a ein.
- Abschmelzphase wesentlich schneller als die Phase der Eisüberdeckung.

Weiterhin kommt /KEL 09/ zu folgender Schlussfolgerung:

Für das zukünftige Klima im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre kann die Perspektive von zehn möglichen Eiszeiten abgeleitet werden, die einmal oder mehrfach das Ausmaß der Elster-Kaltzeit erreichen können. Daraus ergibt sich ebenfalls, dass erneute Rinnenbildungen mit maximalen Erosionstiefen bis etwa 500 m in unkonsolidierten tertiären und quartären Lockermaterialien unterstellt werden müssen. Die Lage möglicher zukünftiger Rinnen kann allerdings nicht vorhergesagt werden. Prinzipiell sind daher an jedem Ort in Norddeutschland Rinnenbildungen möglich.

Nach den Festlegungen in Kapitel 6.1 ist eine Inlandvereisung in randlicher Lage nicht zu unterstellen. Die Prozesse die mit einer Inlandvereisung in randlicher Lage verbun-

den sind, werden durch den Permafrost und durch die vollständige Inlandvereisung abgedeckt.

### Permafrost:

Als Permafrostboden bzw. Dauerfrostboden, werden Böden, Sedimente oder Gesteine bezeichnet, die in unterschiedlicher Mächtigkeit und Tiefe unter der Erdoberfläche mind. 2 Jahre ununterbrochen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt aufweisen. Permafrost ist ein natürliches Ereignis, das mit einer Kaltzeit einhergeht jedoch nicht unterhalb eines Inlandgletschers besteht.

Die Thematik Permafrost ist vielschichtig. So gibt es verschiedene Permafrostarten wie kontinuierlich, diskontinuierlich und sporadischer Permafrost, verschiedene ablaufende Prozesse in der Tau- und Gefrierperiode z. B. Solifluktion, Stauerscheinungen und Kryoturbationen sowie unterschiedliche vorhandene Eisarten im Dauerfrostboden wie z. B. Tabereis, Nadeleis, Gangeis und Intrusiveis. Auf die einzelnen Begrifflichkeiten wird nicht näher eingegangen. Wesentlich sind hier Prozesse die im Zusammenhang mit Permafrost stehen, die zu möglichen Wegsamkeiten für Wässer/ Lösungen führen können.

So können Rissbildungen an der Oberfläche und an der unteren Frostfront stattfinden, aber auch innerhalb des Bodens bei Vorliegen von Taliki vorkommen. Verstärkt wird die Rissbildung durch Eiskeile und Frostsprengung. Unter Talik versteht man ein nicht gefrorenes Gebiet oder eine nicht gefrorene Schicht innerhalb des Bereiches von Permafrost. Talik treten z. B. unter großen Seen, Flüssen oder Meeren auf.

Weitere Prozesse wie Frosthub, Froststauchung, Kammeisgleiten und Solifluktion nach Frost- und Tauzyklen haben einen eher oberflächennahen Einfluss und werden daher nicht weiter betrachtet.

In Kapitel 6.1 wurde erläutert und festgelegt, dass sich Frost-Tauwechsel nur auf wenige Meter der obersten Schicht auswirken. Der oberste Schachtverschluss liegt jedoch für beide Standorte in einer Teufe, bei der eine Einflussnahme nicht zu besorgen ist. Abschließend wird festgelegt, dass für die weiteren Untersuchungen in VerSi eine Permafrosttiefe von 200 m zu unterstellen ist.

Das Ereignis Permafrost wird für wahrscheinlich angesehen. Aufgrund des Zusammenhanges mit Kaltzeiten wird das Ereignis Permafrost ab der Phase 3 relevant. Die Tiefenauswirkung von möglichen Rissen, die durch Permafrost hervorgerufen werden ist unklar und daher schwer einzuschätzen. In /BOR 08/ wird darauf hingewiesen, dass ein Permafrostboden mit maximaler Mächtigkeit von 200 m den Salzstock Gorleben nicht erfasst und daher mit einer Kluftbildung im Salzgestein aufgrund der Abkühlung nicht zu rechnen ist.

#### Kryogene Effekte:

Neben den aufgeführten Prozessen zum Permafrost werden wie bereits in der Funktionsanalyse angesprochen sog. kryogene Effekte diskutiert, die zu Kontraktionsrissen im Salz, ausgelöst durch eine Abkühlung des Salzstockes infolge von Permafrost führen können.

Im Rahmen von VerSi wurde aufgrund der vorliegenden Informationen festgelegt, dass kryogene Risse für keinen Standort zu betrachten sind. Es bestehen Zweifel an der Existenz von kryogenen Rissen in größerer Teufe (s. Kapitel 6.1). Die Zweifel sollten in zukünftigen Arbeiten durch belastbare Untersuchungsergebnisse untermauert werden.

#### Vollständige Inlandeisüberfahrung (Druckbelastung und Entlastung):

In der Funktionsanalyse wurde die Generierung von möglichen Klüften, Rissen usw. durch Druckbelastungen und Entlastung in Betracht gezogen. Solche Entlastungsklüfte, die auf Kaltzeiten zurückgeführt werden, liegen am Salzstandort im Salzspiegelbereich vor.

Es wurde in Kapitel 6.1 festgelegt, dass eine Eisüberfahrung für beide Standorte zu berücksichtigen ist. Dabei ist eine Eisüberdeckung von 700 m zu unterstellen.

Die Entstehung von Entlastungsklüften ist wahrscheinlich. Das Ereignis ist ebenfalls ab der Phase 3 relevant. Inwieweit sich derartige Entlastungsklüfte in die Tiefe auswirken können ist unklar. Analog der möglichen Rissbildung durch Permafrost sind auch hier weitere Untersuchungen vorzunehmen.

### Rinnenbildung:

Rinnenbildung führt zur Druckentlastung, da erhebliche Mengen an Gesteinen ausgehoben und vom Standort abtransportiert werden. Hier können analog zu den Ausführungen zur Inlandeisüberfahung Entlastungsklüfte entstehen. Zudem ist davon auszugehen, dass durch die erosive Wirkung der Schmelzwässer und der damit abtransportierten Gesteine enorme Scherkräfte wirken, die sich auch auf den Untergrund übertragen und somit möglicherweise Wegsamkeiten generieren oder vorhandene Klüfte reaktivieren die dann mit der Rinne (Erosionskanal) in Verbindung stehen.

Am Standort liegt, wie bereits eingangs zur Thematik Kaltzeit beschrieben, eine quartäre Rinne vor. Die Rinne weist eine Länge von ca. 16 km und eine Breite von 1 bis 2 km auf. In einer Tiefe von ca. 300 m grenzt die Rinne an das Hutgestein des Salzstocks und stellenweise auch direkt an das Salz /GRS 98a/.

Die bisher ermittelten und untersuchten Auswirkungen von Kaltzeiten im norddeutschen Raum belegen, dass z. T. erhebliche Veränderungen des Gebietes sowohl über als auch unter der Erdoberfläche damit verbunden waren.

Eine Übertragung des Ausmaßes auf mögliche folgende Kaltzeiten ist mit großen Unsicherheiten verbunden. Eine Gewissheit ob zukünftig noch weitere Rinnensysteme entstehen oder Rinnen die über die bisher festgestellten Tiefenwirkungen hinausgehen, ist nicht gegeben.

Für die Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle ist davon auszugehen, dass Phänomene und deren Auswirkungen die in der Vergangenheit am Standort bzw. in der Region stattgefunden haben in der Analyse zukünftiger möglicher Entwicklungen mit zumindest gleicher Intensität anzusetzen sind.

Folgt man der o. g. Schlussfolgerung nach /KEL 09/, dann scheint ein Sicherheitsnachweis von Endlagerstandorten, die sich nördlich der Nulllinie (0 m Linie der Quartärbasis) befinden und eine Endlagertiefe im Bereich der ermittelten maximalen Erosionstiefen (ca. 500 m) aufweisen, nur bedingt erbringbar. Auf der anderen Seite können Standorte südlich der Nulllinie einer signifikanten hebungsbedingten Erosion ausgesetzt sein.

In Kapitel 6.1 wurde daher festgelegt, dass eine Rinnenbildung für beide Standorte zu berücksichtigen ist. Dabei werden Erosionstiefen bis 250 m unter GOK als wahrscheinliche und Erosionstiefen von 250 m bis 350 m unter GOK als weniger wahrscheinliche Entwicklungen betrachtet. Tiefer gehende Erosionen sind in VerSi nicht zu berücksichtigen.

Die Entstehung einer neuen Rinne am Standort oder das Ausräumen der bestehenden Rinnenstruktur wird für wahrscheinlich erachtet. Das Eintreten dieses Ereignisses ist ab der Phase 3 relevant.

#### Auslösung von lokal begrenzten seismischen Aktivitäten:

In der Funktionsanalyse wurden auf mögliche Auf- und Abwärtsbewegung im Vorland einer Inlandvereisung hingewiesen, die an unter Spannung stehenden Schwächezonen lokale Erdbeben induzieren können.

Unter Schwächezonen werden hierbei bestehende Bruchsysteme bzw. Störungen oder Bereiche mit einer steil liegenden Struktur der Erdkruste, die eine geringere Festigkeit als die Umgebung aufweisen, verstanden. Solche Systeme bzw. Strukturen sind für den Salzstandort nicht bekannt.

Das Ereignis von lokal begrenzten seismischen Aktivitäten wird als unwahrscheinlich erachtet und in VerSi nicht weiter berücksichtigt.

#### Hebungs- und Absenkungsprozesse:

In der Funktionsanalyse wurden Spannungsänderungen durch Hebungs- und Absenkungsprozesse der Erdkruste angesprochen. Der hier betrachtete Salzstandort befindet sich in dem Bereich der Norddeutschen Tiefebene der sich z. Z. in einer Absenkungsphase befindet wobei die Absenkungsraten im Mittel 0,01 mm/a betragen /BGR 01/. Daraus ergibt sich rein rechnerisch eine Absenkung von 10 m im Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren. Die damit verbundenen Spannungsänderungen können aufgrund des langsam ablaufenden geologischen Prozesses vom System ohne Ausbildung von Brüchen abgebaut werden.

Der Salzstandort liegt in einer rezenten Absenkungsphase. Eine Kluft- bzw. Rissbildung wird durch den Absenkungsprozess für unwahrscheinlich erachtet und daher in VerSi nicht weiter betrachtet.

### **Halokinese:**

Der in der Funktionsanalyse angesprochene Mechanismus der Halokinese, beinhaltet einen Aufstieg von plastischen oder weniger dichten Materials aus tiefen Bereichen des Salzstockes und das Durchbrechen des Materials durch das Hangende. Dadurch können im Deckgebirge Klüfte generiert bzw. reaktiviert werden. Für den Salzstandort werden Aufstiegsraten von 0,02 mm/a angenommen, die ohne Berücksichtigung von Subrosion zu einer Hebung des Salzspiegels um etwa 20 m im Nachweiszeitraum führen würde /ISI 08/.

Weiterhin wird in /ISI 08/ ausgeführt, dass die mobileren Salzgesteine im Zentrum des Salzstockes im Nachweiszeitraum um insgesamt 70 m höher gelegt werden.

Der Prozess der Halokinese ist rezent andauernd mit einer gering ausgeprägten Aufstiegsrate.

### **Endlager- und abfallinduzierte Mechanismen:**

#### **Erkundungs-, konstruktions- und betriebsbedingte Aktivitäten:**

Bergmännische und einlagerungsbedingte Aktivitäten wurden in der Funktionsanalyse bereits diskutiert. Die installations- und auffahrungsbedingten sowie betrieblichen Arbeiten begleiten das Endlagerprojekt über alle Phasen bis zum Verschluss des Endlagers. Mit den genannten Aktivitäten ist oftmals eine Störung des geologischen Umfeldes verbunden, die je nach Art und Umfang der durchgeführten Arbeiten mehr oder weniger ausgeprägt sein kann. Mit der Störung gehen Spannungsänderungen einher, die zu möglichen Rissen führen können.

In /ISI 08/ wird ausgeführt, dass vorhandene Klüfte aus anderen Bereichen der Gesteinsabfolge räumlich isoliert sind und kein zusammenhängendes Kluftsystem bilden. Allerdings wird auf den nicht ohne weiteres auszuschließenden Umstand hingewiesen, dass einlagerungs- bzw. auffahrungsbedingte Rissbildungen im Salzgebirge sich mit den natürlich vorhandenen offenen Klüften verbinden und sich dadurch wiederum ein

größeres Kluft-/Rissystem im Nachweiszeitraum als dauerhaft offener Transportpfad für Radionuklide entwickeln könnte.

Wenn man dem genannten Umstand folgt, dann ist ebenfalls nicht ganz auszuschließen, dass ein Lösungszutritt vom WG in den ewG bereits zu einem frühen Zeitpunkt stattfinden kann. D. h., bezogen auf die gewählte Einteilung von Zeitphasen schon in der Phase 1 (0 -10.000 a).

Eine Verbindung von einlagerungs- bzw. auffahrungsbedingten Rissbildungen im Salzgebirge mit den natürlich vorhandenen offenen Klüften zu einem dauerhaft offenen Transportpfad, wie oben ausgeführt, wird als äußerst unwahrscheinlich eingeschätzt. Hier müssen gleichzeitig eine Reihe von Umständen zutreffen, um eine solche Entwicklung real werden zu lassen. Da jedoch gegenwärtig eine derartige Entwicklung nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, besteht hier weiterer Untersuchungsbedarf. Ein Szenario wird für diese Entwicklung und der hier zugrundeliegenden SF nicht abgeleitet.

Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass eine Rissbildung durch erkundungs-, konstruktions- und betriebsbedingten Aktivitäten für wahrscheinlich erachtet wird. Unklar ist die mögliche Ausprägung bzw. Dimension generierter Wegsamkeiten. Vermutlich sind aufgrund einzusetzender gebirgsschonender Verfahren zur Auffahrung der Grube, die möglicherweise entstehenden Risse lokal begrenzt und infolge ablaufender Verheilungsmechanismen in Salz relativ rasch geschlossen. Auch hier müssten weitere Untersuchungen dazu beitragen, den genannten Aspekt genauer einzugrenzen.

Wegsamkeiten die auf der Basis der o. g. Aktivitäten generiert werden sind in der Phase 1 zu berücksichtigen.

#### Wärme entwickelnder Abfall:

Spannungsänderungen hervorgerufen durch Wärme entwickelnden Abfall wurden ebenfalls in der Funktionsanalyse als möglicher Mechanismus zur Generierung von Rissen thematisiert. Ursache dafür sind die mit dem thermischen Eintrag verbundenen Zugentlastungen im WG durch Ausdehnung des Gesteins oder bei nachlassender Wärmeproduktion durch Kontraktion.

Die Generierung von Rissen aufgrund der Wärmeentwicklung ist ein wahrscheinlicher Mechanismus, der in den Phasen 1 und 2 entsprechend berücksichtigt werden muss.

#### Resümee:

Im Zusammenhang mit der gesamten Darstellung (zu a), b) und c)) sind rein formal und qualitativ die zu einer Einschränkung/ Aufhebung der SF notwendigen Bedingungen gegeben. D. h., dass die relevanten Systemkomponenten vorliegen bzw. festgelegt wurden, das Vorliegen von Wässern/ Lösungen über den Zutritt von außen in das WG möglich und auch die Bedingung über vorliegende (bekannt und unbekannt) und zukünftigen nicht ausschließbaren Wegsamkeiten gegeben ist. Inwieweit sich diese Wegsamkeiten durch das WG zum ewG entfalten, sich mit anderen Rissen und Klüften verbinden können und welche Abmessung mögliche Transportpfade aufweisen kann im Rahmen einer Szenarienentwicklung nicht geklärt werden. Hier werden thermomechanische Rechnungen in Sicherheitsanalysen weiteren Aufschluss geben müssen.

#### Szenarien:

Aus der geführten Diskussion zur Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“ lassen sich folgende Szenarien ableiten:

Hinweis: Die folgenden Szenarien sind mit einer Kennnummer in der Form S\_X\_Y versehen. Das (S) steht für Szenario, (X) bezeichnet in Anlehnung an die Hauptgruppen der FEP das bezugnehmende Phänomen (1 = Natürliche Phänomene, 2 = Anthropogen induzierte Phänomene, 3 = Endlager und Abfall induzierte Phänomene) und (Y) beinhaltet die laufende Nummer für das entsprechende Phänomen.

#### **Szenario: S\_1\_1 „Kaltzeit mit vollständiger Inlandeisüberfahrung“**

##### Beschreibung:

Bedingt durch eine Kaltzeit wird der Salzstandort von einem 700 m mächtigem Inlandeis überdeckt. In der Rückzugsphase der Eisüberdeckung wird der Standort entlastet. Mit dieser Druckentlastung entstehen sog. Entlastungsklüfte, die über das WG bis zum ewG führen.

Anmerkung: Vorstellbar ist auch, dass die Entlastungsklüfte in das WG hineinreichen und daran anschließend durch Subrosion die Verbindung zum ewG erfolgt. Hierzu ist eine Kombination mit einem Subrosionsszenario zu diskutieren.

#### Wässer/ Lösungen:

Ausreichende Mengen an Wässer/ Lösungen sind durch das abschmelzende Eis gegeben.

#### Zeitpunkt für die Initiierung:

Siehe Diskussion zu Kaltzeiten. Mögliche Zeitmarken für eine Initiierung sind einmalig in der Phase 3 und mehrmals in der Phase 4 gegeben, wenn man von einem Zyklus ausgeht, der 100.000 a beträgt. Hier scheint es hilfreich zu sein ein Referenzklima regulatorisch vorzugeben.

#### Einschätzung des Szenarios:

Die Kaltzeit mit der Eisüberdeckung wird als wahrscheinlich angesehen. Auch die Generierung von Entlastungsklüften ist wahrscheinlich. Jedoch wird eine Tiefenwirkung der Entlastungsklüfte bis in den ewG hinein für unwahrscheinlich erachtet.

### **Szenario: S\_1\_2 „Kaltzeit mit Rinnenbildung“**

#### Beschreibung:

Bedingt durch eine Kaltzeit wird der Salzstandort von einem 700 m mächtigem Inlandeis überdeckt. In der Rückzugsphase der Eisüberdeckung wird durch erosive Schmelzwässer eine tiefgehende Rinne in den Standort generiert. Mit dem Erosionsprozess werden große Massen an Gestein abgetragen. Dadurch erfährt der Standort eine Druckentlastung. Mit dieser Druckentlastung entstehen sog. Entlastungsklüfte die vom Fuß der Rinne über das WG bis zum ewG führen.

Anmerkung: Vorstellbar ist auch, dass die Entlastungsklüfte in das WG hineinreichen und daran anschließend durch Subrosion die Verbindung zum ewG erfolgt. Hierzu ist eine Kombination mit einem Subrosionsszenario zu diskutieren.

#### Wässer/ Lösungen:

Ausreichende Mengen an Wässer/ Lösungen sind durch das abschmelzende Eis gegeben.

#### Zeitpunkt für die Initiierung:

Siehe Diskussion zu Kaltzeiten. Mögliche Zeitmarken für eine Initiierung sind einmalig in der Phase 3 und mehrmals in der Phase 4 gegeben, wenn man von einem Zyklus ausgeht, der 100.000 a beträgt.. Hier scheint es hilfreich zu sein ein Referenzklima regulatorisch vorzugeben.

#### Einschätzung des Szenarios:

Die Entstehung einer Rinne wird als wahrscheinlich angesehen. Auch die Generierung von Entlastungsklüften ist wahrscheinlich. Unklar ist allerdings, ob die Tiefenwirkung der Rinne ausreicht Entlastungsklüfte bis zum ewG zu generieren.

### **Szenario: S\_2\_1 „Erkundungs-, konstruktions- und betriebsbedingte Spannungsänderungen“**

#### Beschreibung:

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten in der Erkundungs-, Konstruktions- und/ oder Betriebsphase sind Spannungen induziert worden, die eine unbemerkte Wegsamkeit vom lösungserfüllten Hauptanhydrit in der Nähe des Infrastrukturbereiches in den ewG via dem WG geschaffen haben.

#### Wässer/ Lösungen:

Das Lösungsvolumen des Hauptanhydrits im Umkreis des Infrastrukturbereichs wurde zu 1.000 m<sup>3</sup> bzw. unter Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors zu 12.500 m<sup>3</sup> abgeschätzt (siehe Ausführungen zu b)).

#### Zeitpunkt für die Initiierung:

Im Prinzip kann schon vor dem Verschluss des Endlagers eine Lösungsbewegung vom lösungserfüllten Hauptanhydrit in Richtung des WG bzw. ewG erfolgen. Für die Initiierung des Szenarios ist daher von einem frühen Zeitpunkt auszugehen (Phase 1).

#### Einschätzung des Szenarios:

Das in den genannten Phasen der Erkundung, Konstruktion und Betrieb Spannungen induziert werden ist als wahrscheinlich einzustufen. Auch das Vorliegen von Lösungsvorkommen im infrastrukturnahen Hauptanhydrit ist als wahrscheinlich zu betrachten. Unklar ist jedoch, ob die Spannungsänderungen das Potenzial haben eine entsprechende Wegsamkeit zu generieren. Im Fall, dass das Potenzial vorhanden ist, wird im Sinne der Auslegungsoptimierung darauf einzugehen sein.

#### **Szenario: S\_3\_1 „Abfallinduzierte Thermospannungen“**

#### Beschreibung:

Durch den eingelagerten wärmeentwickelnden Abfall werden thermische Spannungen induziert, die eine Wegsamkeit vom lösungserfüllten Hauptanhydrit in der Nähe des Infrastrukturbereiches in den ewG via dem WG generieren.

#### Wässer/ Lösungen:

Das Lösungsvolumen des Hauptanhydrits im Umkreis des Infrastrukturbereichs wurde zu 1.000 m<sup>3</sup> bzw. unter Einbeziehung eines Sicherheitsfaktors zu 12.500 m<sup>3</sup> abgeschätzt (siehe Ausführungen zu b)).

#### Zeitpunkt für die Initiierung:

Bis sich die Wärmeentwicklung im Bereich des Hauptanhydrits bemerkbar machen werden vermutlich einige tausend Jahre nach Verschluss des Endlagers vergehen. Die Einschätzung wurde aus der Darstellung von Temperaturerhöhungen abgeleitet, die das Durchschreiten eines Maximums für die Richtstrecke nach ca. 600 Jahren zeigt /GRS 09/.

Für die Initiierung des Szenarios ist daher von einem Zeitpunkt im ersten Drittel bis Mitte der Phase 1 auszugehen.

#### Einschätzung des Szenarios:

Das Auftreten von thermischen Spannungen im Bereich des Hauptanhydrits ist wahrscheinlich. Auch das Vorliegen von Lösungsvorkommen im infrastrukturnahen Hauptanhydrit ist als wahrscheinlich zu betrachten. Auch hier ist unklar, ob die Spannungsänderung das Potenzial haben eine entsprechende Wegsamkeit zu generieren. Im Fall, dass das Potenzial vorhanden ist, wird im Sinne der Auslegungsoptimierung darauf einzugehen sein.

#### **Szenario: S\_1\_3 „vorauselende Subrosion“**

Das Szenario beschreibt eine Entwicklung, die in Verbindung mit den Sicherheitsfunktionen SF\_8 „Integritätserhalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion“ und SF\_9 „Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts“ des WG steht. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die SF\_8 im Gegensatz zur SF\_9 hier nicht ausführlich untersucht und diskutiert wurde. Die SF\_8 wurde nur im Zusammenhang mit Kapitel 5.3 angezogen. Die beschriebene Entwicklung hat daher nur exemplarischen Charakter, um den Zusammenhang von Sicherheitsfunktionen zur Ableitung von Szenarien aufzuzeigen.

#### Beschreibung:

Grundlage dieses Szenario bildet das Kaliflöz-Staßfurt, das das für die Endlagerung vorgesehene Staßfurt-Steinsalz flankiert. Das Kaliflöz-Staßfurt steht in steiler Lagerung und reicht vom Salzspiegel bis zum Salzstockfuß in über 3000 m Tiefe (siehe hierzu Abb. 6.2 und 6.3). Angrenzend an das Kaliflöz verläuft der Hauptanhydrit. Das Kalisalz weist gegenüber dem Steinsalz eine z. T. signifikant erhöhte Löslichkeit auf. Hierdurch ist eine selektive vorauselende Subrosion des Kaliflözes nicht ausgeschlossen (Bezug zur SF\_8). Gestützt wird dieser Mechanismus durch Bohrungsbefunde, die örtlich eine Zone bis maximal 130 m tief in den Salzgesteinskörper hineinreichende lokale Auflösung belegen /APP 06/.

Lösungen dringen durch vorauselende Subrosion im Kaliflöz weit in die Tiefe vor (z. B. bis zum Einlagerungshorizont). Durch mögliche Klüfte oder Risse (z. B. bedingt durch

die Auffahrung des Endlagers) erfolgt eine Verbindung von der Subrosionsfront über das WG in den ewG (Bezug zur SF\_9).

#### Wässer/ Lösungen:

Quellen für potenzielle Lösungen/ Wässer sind durch den Hauptanhydrit oder über das Kaliflöz selbst durch Kontakt mit Grundwässern aus dem Bereich des Hutgesteins gegeben.

#### Zeitpunkt für die Initiierung:

Eine vorausseilende Subrosion im Kaliflöz kann theoretisch schon zu einem frühen Zeitpunkt erfolgen. Weiterhin sind erkundungs-, konstruktions- und betriebsbedingte Wegsamkeiten zu einem frühen Zeitpunkt möglich. Für die Initiierung des Szenarios ist daher die Phase 1 zugrunde zu legen.

#### Einschätzung des Szenarios:

Das Phänomen der selektiven vorausseilenden Subrosion ist bekannt und wird durch Bohrungsbefunde am Salzstandort gestützt (siehe Beschreibung). In /BOR 08/ (s. 186) wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine tiefgreifende vorausseilende Subrosion am Kaliflöz nur dann vorkommt, wenn das Flöz in überkippter Lagerung angetroffen wird. Bei einer normalen Lagerung verhindern junge tonige Schichten eine verstärkte Subrosion. Über dem geplanten Einlagerungsbereich wird an dem Salzstandort keine überkippte Lagerung des Kaliflözes Staßfurt erwartet.

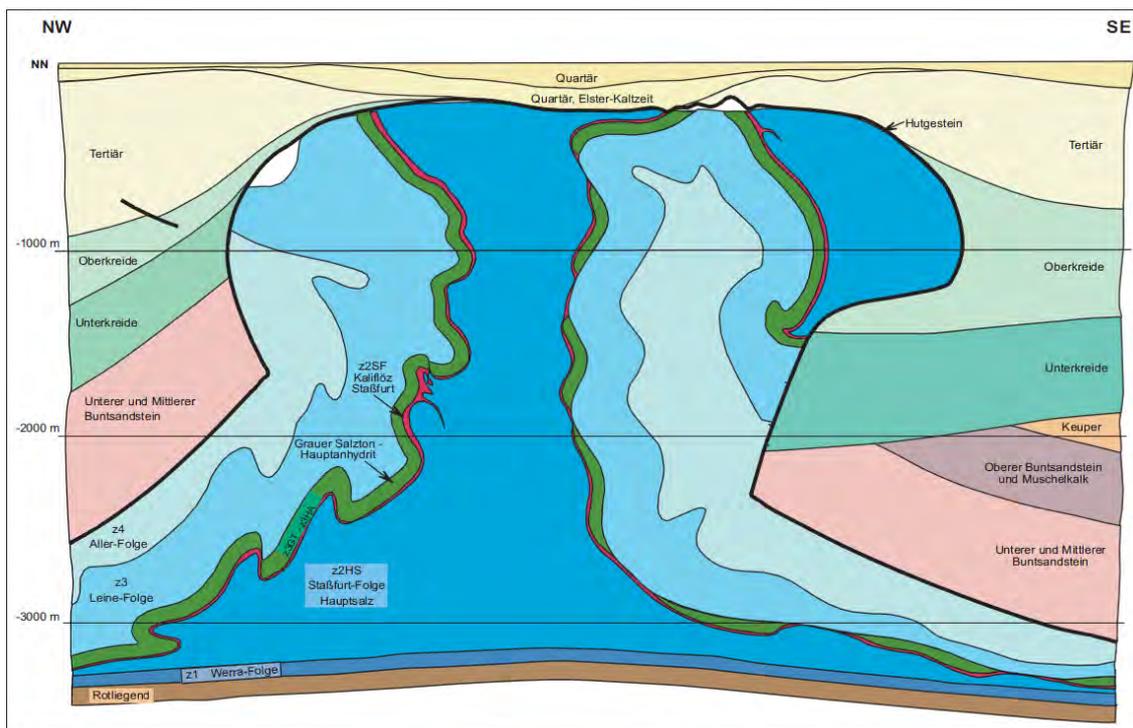


Abb. 6.2: Vertikalschnitt (NW – SE) des Salzstocks Gorleben /BGR 07/

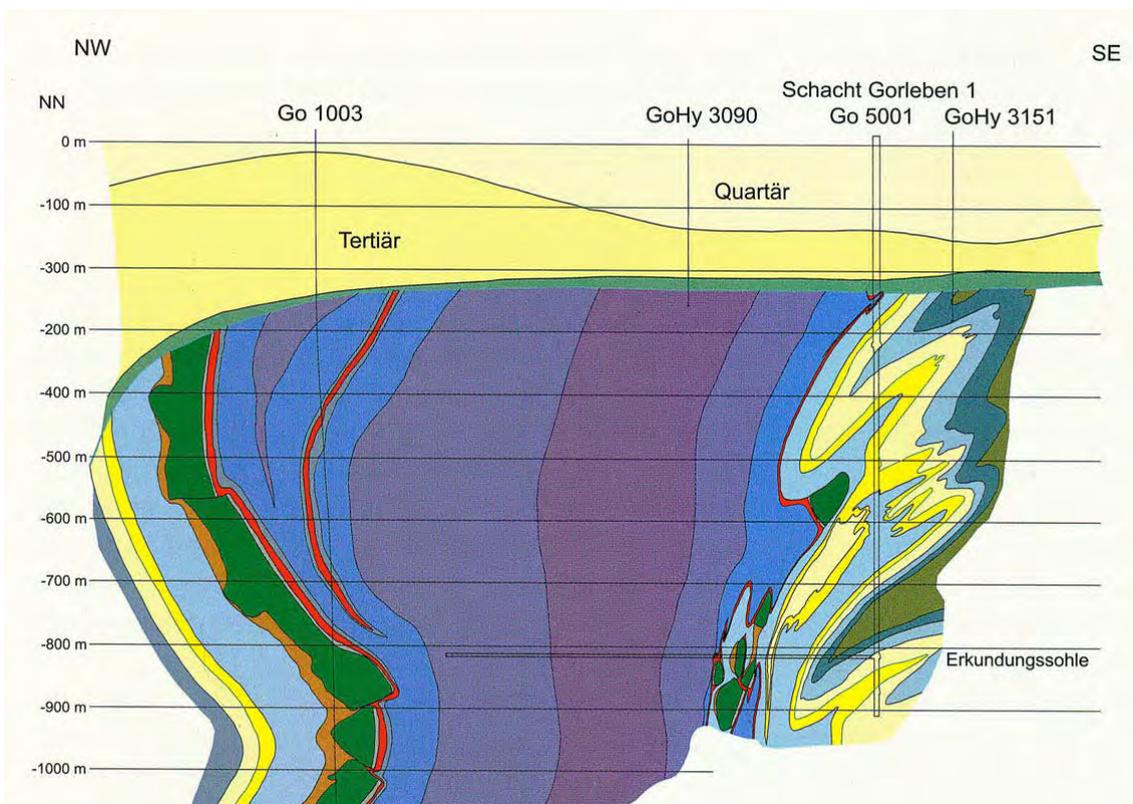


Abb. 6.3: Vertikalschnitt (NW – SE) des Salzstocks Gorleben bis -1000 m und der Darstellung der Erkundungssohle sowie des Schachtes /BOR 08/

Abschließend zur Ableitung von Szenarien noch einige Anmerkungen zur Methodik und zu deren Anwendung:

Die beispielhafte Anwendung der entwickelten Methodik hat gezeigt, dass es möglich ist, entlang der einzelnen Verfahrensschritte (Kapitel 2) von der Datengrundlage (Kapitel 3), der Beschreibung der erwarteten Entwicklung (Kapitel 4), der Durchführung einer Funktionsanalyse (Kapitel 5) und über die Diskussion der Ergebnisse aus dieser Analyse gespiegelt an konzept- und standortspezifischen Gegebenheiten (Kapitel 6) in systematischer Weise Szenarien abzuleiten. Hiermit liegt ein Werkzeug vor, das eine solide Grundlage für weitere sicherheitsanalytische Betrachtungen liefern kann. Mit der beispielhaften Anwendung der systematischen Vorgehensweise wurde erstmalig gezeigt, dass durch die Festlegung und Diskussion von Sicherheitsfunktionen eine Entwicklung von Szenarien betrieben werden kann.

In der Funktionsanalyse wurde deutlich, dass sich die Sicherheitsfunktionen weitgehend isoliert von anderen Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems untersuchen und diskutieren lassen. Damit ist ein entscheidender Vorteil der Methodik verbunden, da somit die Untersuchung fokussiert werden kann und überschaubar bleibt.

Die Methodik ist nicht an bestimmte Endlagerkonzepte und Standortgegebenheiten gebunden. Eine Anwendung könnte im Prinzip auch auf andere kerntechnische Anlagen erfolgen. Weiterhin erlaubt die Methodik bei der Anwendung bis zu einem gewissen Grad ohne standortspezifische Details auszukommen. Hiervon ausgenommen ist natürlich die Beschreibung der erwarteten Entwicklung. D. h., das bei der Untersuchung weiterer Endlagerstandorte denen ein gleiches oder zumindest ähnliches Endlagerkonzept zugrunde liegt, die erarbeiteten Ergebnisse bis einschließlich der Funktionsanalyse zum großen Teil übernommen werden können.

Allerdings belegt der vorliegende Bericht auch, dass der Aufwand für eine umfassende Szenarientwicklung enorm ist. D. h., dass die hier illustrativ durchgespielte Verfahrenskette, für jede Sicherheitsfunktion zu durchlaufen ist. Ein Aufwand, den es sich jedoch nach Meinung der Autoren aus sicherheitstechnischer Sicht lohnt zu betreiben.

Möglicherweise nachteilig wirken sich die mit den Verfahrensschritten verbundenen subjektiven Entscheidungsfindungen aus. Diese Subjektivitäten lassen sich nicht ganz vermeiden. Einen Weg wie mit der Thematik umgegangen werden kann, zeigt Kapitel 7

in dem subjektive Einflüsse im Verfahren identifiziert und benannt, sowie deren Einflussnahme diskutiert wurden.

### **6.3 Festgelegte Szenarien und Abgleich**

Das Verbundvorhaben VerSi setzt sich aus vier Teilvorhaben, die in Wechselbeziehung zueinander stehen, zusammen. Wechselbeziehung heißt, dass Arbeitsergebnisse aus den verschiedenen Teilvorhaben mögliche Eingangsdaten bzw. Ausgangsdaten für andere Teilvorhaben bilden.

Da die Methodik zur Ableitung von Szenarien auf der Basis der in Kapitel 2 vorgestellten Vorgehensweise planungsgemäß erst am Ende des Vorhabens 3607R02580 zur Verfügung steht und eine Anwendung exemplarisch erfolgt, wurden im Rahmen eines Workshops /VER 08a/ orientierend an der zu erwartenden Entwicklung beider Endlagerkonzepte und Standorte vorab mögliche Szenarien diskutiert. In weiteren Fachgesprächen /VER 08b/ sind zusätzliche Absprachen hinsichtlich der Festlegung von Szenarien aber auch von nicht zu berücksichtigenden Phänomenen oder Szenarien getroffen worden (siehe Kapitel 6.1). Die Tabelle 6.1 zeigt den Diskussionsstand zum Ende dieses Teilvorhabens hinsichtlich festzulegender Szenarien für langzeitanalytische Untersuchungen /VER 09/.

Neben der Darstellung der festgelegten Szenarien wird in diesem Kapitel ein Abgleich zur erwarteten Entwicklung (Kapitel 4) und zu den abgeleiteten Szenarien (Kapitel 6.2) vorgenommen.

Aus der Tabelle 6.1 wird ersichtlich, dass für beide Standorte die gleiche Anzahl an Szenarien für die Endlagerstandorte zugrunde gelegt wurde. Jeweils 7 Szenarien sind zu betrachten, von denen 3 als wahrscheinlich und 4 als weniger wahrscheinlich eingestuft wurden.

Tab. 6.1: Stand zur Festlegung von Szenarien für den Salzstandort und Tonstandort als Grundlage für die Langzeitsicherheitsanalysen

Nr.	Szenarien Salzstandort	Nr.	Szenarien Tonstandort	Einstufung
1	Bezugsszenario + Kaltzeit ohne Eisbedeckung	1/5	Bezugsszenario + Kaltzeit ohne Eisüberdeckung	wahrscheinlich
5	Anfänglich defekte Behälter von 0,1%	3	Anfänglich defekter Behälter von 0,1%	wahrscheinlich
6	Kaltzeit mit Eisüberdeckung	6	Kaltzeit mit Eisüberdeckung	wahrscheinlich
2	Versagen beider Schachtverschlüsse	2a	Ausfall des Verschlusses im zentralen Hauptschacht	wenig wahrscheinlich
3	Versagen einer der Streckenverschlüsse in den Richtstrecken	2b	Ausfall von Abdichtbauwerken in der Baustrecke zu einer Hälfte des HAW-Bereichs und zu einem HAW-Einlagerungstunnel auf Seite Baustrecke	wenig wahrscheinlich
7	Glaziale Rinne 350 m	7	Glaziale Rinne 350 m	wenig wahrscheinlich
3+5	Versagen einer der Streckenverschlüsse in den Richtstrecken + Anfänglich defekte Behälter 0,1%	4	Kombination der Szenarien (2b) und (3)	wenig wahrscheinlich

Im Prinzip stützen sich die Szenarien für die beiden Standorte auf ähnliche Entwicklungsvorgaben ab, die wie folgt zusammengefasst werden können:

- Ausgangsbasis ist in beiden Fällen ein Bezugsszenario mit der Einbeziehung einer Kaltzeit ohne Eisbedeckung.
- Weiterhin wird in beiden Fällen davon ausgegangen, dass ein kleiner Anteil der Endlagerbehälter mit anfänglichen Defekten behaftet ist.
- Neben der Betrachtung einer Kaltzeit ohne Eisbedeckung wird auch der Fall einer Kaltzeit mit Eisbedeckung als wahrscheinlich angesehen und entsprechend berücksichtigt.
- Ein weiteres Merkmal im Zusammenhang mit Kaltzeiten ist im norddeutschen Raum mit der Entstehung sog. „Quartärer Rinnen“ verbunden. In beiden Fällen wird eine Rinnenbildung von 350 m Tiefe betrachtet. Das Szenario wird aufgrund dieser Tiefenauswirkung als wenig wahrscheinlich eingestuft.
- Die restlichen Szenarien, die ebenfalls als wenig wahrscheinlich einzustufen sind, beziehen sich auf einen möglichen Versagen von Schacht- und Streckenabdich-

tungen sowie eine Kombination aus Versagen von Streckenabdichtungen und anfänglich defekten Behältern.

Die mit den möglichen Festlegungen von Szenarien bzw. dem Ausschluss von Phänomenen und Szenarien verbundenen subjektiven Entscheidungen werden in Kapitel 7 thematisiert.

Der Abgleich beinhaltet die Gegenüberstellung und Diskussion von Szenarien, die aus der Beschreibung der erwarteten Entwicklung und der Ableitung resultieren zu den o. g. festgelegten Szenarien.

Die Beschreibung der erwarteten Entwicklung (Kapitel 4) beinhaltet bereits die festgelegten Szenarien 1, 5 und 6 für den Salzstandort und 1/5, 3 und 6 für den Tonsteinstandort. Daher deckt sich auch die Einschätzung hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit mit den entsprechenden Angaben bei den festgelegten Szenarien.

Die in Kapitel 6.2 abgeleiteten Szenarien sind das Ergebnis aus der beispielhaften Betrachtung und Diskussion einer Sicherheitsfunktion. Ein Abgleich im Sinne einer umfassenden Bilanzierung von zu betrachtenden Szenarien in VerSi ist somit nicht gegeben. Weiterhin zielen die abgeleiteten Szenarien auf mögliche Ausbreitungswege im Wirtsgestein ab, die unter thermomechanischen Betrachtungen und entsprechenden Analysewerkzeugen zu untersuchen sind. Die festgelegten Szenarien werden jedoch im Teilvorhaben WS 2044 im Rahmen von Rechencodes modelliert, die auf die Radionuklidfreisetzung im Sinne der Ermittlung von Konzentrationen und Dosis abheben. Hinsichtlich der abgeleiteten Szenarien ist zu konstatieren, dass die wesentlichen auslösenden Ereignisse wie vollständige Inlandeisüberfahung und Rinnenbildung auch den festgelegten Szenarien zugrunde gelegt worden sind, wenn auch wie oben beschrieben vor einem anderen Hintergrund.

Es verbleiben somit bei den festgelegten Szenarien diejenigen, die sich auf den Ausfall von Abdichtbauwerken beziehen. Wenn nun die theoretische Frage gestellt würde, ob diese Szenarien auch das Ergebnis einer umfassenden Anwendung der entwickelten Methodik hätten sein können, dann müsste man diese sehr wahrscheinlich bejahen auch ohne eine intensive Funktionsanalyse betrieben zu haben. Der Grund dafür ist, dass bei technischen Bauwerken immer FEP wie Materialfehler und Konstruktionsmängel zu berücksichtigen sind, die nie ganz auszuschließen sind.

## **7           Potenzielle - und unvermeidbare subjektive Einflüsse**

Das vorliegende Kapitel soll mögliche Quellen für subjektive Einflüsse entlang der in den zuvor beschriebenen Arbeitsabläufen aufzeigen. Für die spätere Einschätzung bzw. Interpretation der Arbeitsergebnisse ist es essentiell, derartige Quellen zu identifizieren und zu dokumentieren. Das Erkennen solcher Einflüsse und deren Einschätzung hinsichtlich der Relevanz auf das Ergebnis liefern Ansatzpunkte zur Begrenzung der Einflussnahme bzw. zur Reduzierung z. B. durch Einholung von Experteneinschätzungen.

Die Szenarienentwicklung wird von einer Reihe von subjektiven Einflüssen begleitet. Ein bestreben nach mehr Objektivität bei der Entwicklung von Szenarien wird in der Reduzierung von subjektiven Einflüssen gesehen. Die subjektiven Einflüsse können sich bereits bei der Vorgabe von Rahmenbedingungen einstellen und setzen sich z. B. bei der Auswahl von Daten, der Festlegung und des Ausschlusses von Phänomenen sowie in der Beurteilung von Mechanismen und von Entscheidungsprozessen fort.

Es besteht allgemein Konsens darüber, dass subjektive Einflüsse im Rahmen der Szenarienentwicklung nicht ganz auszuschließen sind. In einem früheren Vorhaben der GRS sind eine Reihe von Ansätzen zur Szenarienentwicklung miteinander verglichen und beurteilt worden. Folgendes Zitat gibt ein wesentliches Ergebnis dieses Vergleiches wieder /GRS 98b/:

„Allen betrachteten Ansätzen ist die subjektive Komponente im Entscheidungsmechanismus gemeinsam. Es handelt sich hierbei weder um eine Schwäche von Verfahren noch um ein Spezifikum der Endlagerproblematik, sondern um eine Eigenschaft, die in der Natur des menschlichen Erkenntnisprozesses begründet ist. Ansätze, die diesen Faktor durch einen Formalismus verschleiern, sind kritisch zu bewerten. Hilfreich und notwendig sind Formalismen dagegen bei der (objektiven) Dokumentation subjektiver Entscheidungen, wobei größtmögliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit anzustreben ist.“

Insgesamt werden die o. g. Aussagen durch folgendes Zitat in konzentrierter Form wiedergegeben /APP 07/:

„Subjektiv mitgeprägte Bewertungen können nicht vollständig verhindert werden; es ist aber möglich, den subjektiven Anteil zu reduzieren und im Entscheidungsprozess deutlich zu machen.“

In diesem Kapitel werden mögliche und nicht vermeidbare subjektive Einflüsse in Bezug auf die in Kapitel 2 genannten Verfahrensschritte herausgestellt und dokumentiert. Darüber hinaus erfolgen eine Einschätzung der Subjektivität und die damit verbundene Auswirkung auf das Arbeitsergebnis. Abschließend werden einzubeziehende Aspekte hinsichtlich zu treffender Annahmen und Festlegungen im Vorhaben VerSi dargestellt.

Unter dem Kapitel 3 wurden die Vorgehensweise zur Aufstellung von Systemkomponenten, der Erstellung der FEP-Datengrundlage sowie deren Einengung auf die möglicherweise relevanten FEP und der Zuordnung der FEP zu den Systemkomponenten, der Zusammenstellung der Datengrundlage zu Sicherheitsfunktionen und der Festlegung von relevanten Sicherheitsfunktionen beschrieben. In Kapitel 4 wurde die erwartete Entwicklung für die beiden Endlagerstandorte beschrieben. Eine Analyse ausgewählter Sicherheitsfunktionen erfolgte in Kapitel 5. Abschließend wurde in Kapitel 6 die beispielhafte Ableitung von Szenarien für beide Standorte vorgenommen. Jeder Schritt in der Vorgehensweise ist von subjektiven Einflüssen in Form von Handlungen und Entscheidungen begleitet, die im Folgenden dokumentiert werden:

#### Aufstellung von Systemkomponenten

Die in Kapitel 3.1 aufgestellten und beschriebenen Systemkomponenten sind relativ eindeutig im Rahmen der Identifizierung ausgemacht worden. Der Vorgang der Identifizierung ist zwar subjektiven Einflüssen unterlegen, jedoch ist die Aufstellung der sog. Hauptsystemkomponenten für die beiden Endlagersysteme unstrittig. Eine weitere Differenzierung der Systemkomponenten nach konzeptspezifischen und standortspezifischen Gegebenheiten ist möglich und wurde auch vorgenommen. Für die Entwicklung der Szenarien und der Vergleichsmethodik ist es jedoch ausreichend, die weitere Analyse entlang der Hauptsystemkomponenten vorzunehmen. In Bezug auf das Arbeitsergebnis und dem angestrebten Vergleich wird die Vernachlässigung möglicher ausschlaggebender Komponenten aufgrund der eindeutigen Identifizierbarkeit ausgeschlossen. Die subjektiven Einflüsse sind hier von untergeordneter Bedeutung.

## FEP-Datengrundlage

Bei der Erstellung der FEP-Datengrundlage wurde eine FEP-Ausgangsliste zugrunde gelegt, die anhand von externen Datengrundlagen verifiziert und bei Bedarf ergänzt wurde. Sowohl die Ausgangsliste als auch die externen Datengrundlagen sind das Ergebnis einer mehr oder weniger angelegten subjektiven Zusammenstellung von FEP. Bezeichnend für die externen Datengrundlagen ist die Anzahl an FEP die z. T. stark variiert und die unterschiedliche Benennung bzw. Charakterisierung der FEP.

Hinsichtlich der externen Datengrundlagen ist davon auszugehen, dass für die Zusammenstellung der FEP entweder als Ausgangspunkt oder als Referenz zum Nachweis der Vollständigkeit der FEP eine Datengrundlage wie z. B. die NEA FEP Datenbank herangezogen wurde. Ein Beispiel hierfür ist die Zusammenstellung des ISIBEL FEP-Katalogs und dem Abgleich mit der NEA FEP Datenbank. Mit dem Abgleich sollte gezeigt werden, dass alle relevanten Einflussfaktoren betrachtet worden sind /ISI 08/.

Obwohl die NEA FEP Datenbank auf weltweiten Erfahrungen aus verschiedenen Endlagerprojekten mit unterschiedlichen Abfallspezifikationen und Wirtsgesteinstypen aufbaut, ist das Ergebnis dennoch nicht frei von subjektiven Einflüssen. Hier ist allerdings davon auszugehen, dass die subjektiven Einflüsse in reduzierter Form vorliegen, da die Datenbank breit angelegt und unter Einbindung unterschiedlichster Fachdisziplinen mit entsprechenden Expertisen erstellt wurde. Darüber hinaus diente die Datenbank als Referenz für eine Reihe anderer Datengrundlagen und wurde somit einer fortlaufenden indirekten Prüfung unterzogen.

Abschließend ist zu sagen, dass die für das Vorhaben 3607R02580 erstellte FEP-Datengrundlage auf der Basis einer unvermeidbaren subjektiven Zusammenstellung erfolgte. Allerdings wird aufgrund der verschiedenen für einen Abgleich eingebundenen externen Datengrundlagen die mögliche Unwägbarkeit, einen für den Vergleich mitentscheidenden relevanten Faktor außer Acht gelassen zu haben, für gering erachtet.

## Ausschluss von FEP und Identifizierung möglicherweise relevanter FEP

Im nächsten Schritt wurden aus der für dieses Vorhaben 3607R02580 erstellten FEP-Datengrundlage diejenigen FEP ausgeschlossen, die auf aufgestellte Ausschlusskriterien zutrafen. Weiterhin sind FEP die einen möglicherweise relevanten Einfluss auf die Endlagersysteme bzw. Standorte haben mit einem entsprechenden Vermerk in der

Datenbank ausgewiesen worden. In beiden Fällen sind subjektive Einflüsse gegeben. Der zweite Fall, hinsichtlich der Identifizierung von möglicherweise relevanten FEP, wirkt sich bei einer möglichen Fehleinschätzung nicht auf das eigentliche Arbeitsziel der Entwicklung von Szenarien aus. Wesentlicher ist hier der erste Fall, der den Ausschluss von FEP aus dem Verfahren beinhaltet. Ein Ausschluss essentieller FEP, sei es aus formalen Gründen z. B. durch die Vorgabe von Rahmenbedingungen oder durch eine mögliche Fehleinschätzung, könnte sich auf das Arbeitsergebnis und damit auch auf den angestrebten Vergleich auswirken. Hier ist es aus Gründen der Nachvollziehbarkeit und Transparenz unerlässlich, den oder die Gründe, die zu einem Ausschluss geführt haben, detailliert zu dokumentieren.

#### Zuordnung der FEP zu den Systemkomponenten

Der nächste Schritt, der auf subjektiven Einschätzungen basiert, beinhaltet die Zuordnung der FEP zu den Systemkomponenten. Dieser Arbeitsschritt ist, wie bereits in Kapitel 3.2.4 beschrieben, wesentlich für die Analyse der Sicherheitsfunktionen. Um mögliche Bandbreiten bei der Einschätzung der Zuordnung von FEP zu den Systemkomponenten erkennen zu können, wurde dieser Schritt von zwei Mitarbeitern unabhängig voneinander durchgeführt. Im Ergebnis war zu konstatieren, dass für den überwiegenden Teil an FEP eine gute Übereinstimmung vorlag, aber für den restlichen Teil die Zuordnungen teilweise weit auseinanderlagen. Gründe für die teilweise sehr unterschiedliche Zuordnung sind vor allem auf ungleiche Vorkenntnisse in den verschiedenen angesprochenen Fachdisziplinen sowie der Wahrnehmung bzw. Vorstellung möglicher Auswirkungen des jeweiligen FEP zurückzuführen. Auch in diesem Schritt kann sich eine mögliche Fehleinschätzung auf das Arbeitsergebnis und damit auch auf den angestrebten Vergleich auswirken.

Für eine spätere Anwendung der Vergleichsmethodik ist analog dem Ausschluss von FEP eine detaillierte Dokumentation hinsichtlich der Zuordnung von FEP zu den Systemkomponenten vorzunehmen. Darüber hinaus ist eine unabhängige Zuordnung von verschiedenen Stellen anzustreben, um das Streuungsmaß der subjektiven Einschätzungen erkennen zu können und damit Häufungspunkte von unterschiedlichen Auffassungen und Einschätzungen hinsichtlich der Zuordnung auszumachen. Eine Eliminierung der subjektiven Einflüsse ist damit jedoch nicht verbunden. Der Abgleich der Einzelzuordnungen z. B. in einem größeren Kreis von Experten kann dazu beitragen, dass die wesentlichen Einflüsse der FEP auf die Systemkomponenten erfasst werden.

### Datengrundlage an Sicherheitsfunktionen

Zur Festlegung von Sicherheitsfunktionen (SF) wurden in einem ersten Ansatz SF aus unterschiedlichen nationalen Berichten bzw. Quellen zusammengetragen. Die SF-Datengrundlage erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Mit der Zusammenstellung der SF war die Absicht verbunden, sich einen Überblick über SF aus verschiedenen Ländern und Organisationen zu verschaffen sowie daraus ein Gefühl für den Umgang mit SF zu entwickeln. Die Subjektivität, die mit diesem Schritt verbunden ist, bezieht sich allenfalls auf die Auswahl der herangezogenen Referenzen. Eine Auswirkung auf das Arbeitsergebnis kann daraus nicht abgeleitet werden.

### Festlegung von relevanten Sicherheitsfunktionen

Die Festlegung von relevanten Sicherheitsfunktionen ist nicht frei von subjektiven Einflüssen. Es wird empfohlen, analog zu dem Schritt der Zuordnung der FEP zu den Systemkomponenten, eine voneinander unabhängige Festlegung von mehreren Bearbeitern vorzunehmen.

Eine ähnliche Streubreite der Einschätzungen wie bei der Zuordnung der FEP zu den Systemkomponenten wird für die Festlegung der SF nicht erwartet. Insbesondere die zugrunde liegende Anzahl und Art an Systemkomponenten und die Intention für jede dieser Systemkomponenten SF festzulegen sprechen für diese Vermutung.

Mögliche unerkannte wesentliche SF können sich auf das Arbeitsergebnis und damit auch auf den angestrebten Vergleich auswirken. Zur Erhöhung des Vertrauens, dass eine umfassende Basis an festgelegten SF vorliegt, ist bei einer späteren Anwendung der Methodik die Einbeziehung mehrerer Expertisen anzustreben und die detaillierte Dokumentation für die Festlegung der SF vorzunehmen.

### Erwartete Entwicklung der Standorte

Mit der erwarteten Entwicklung wird die Erwartungshaltung hinsichtlich der Evolution des Endlagersystems wiedergegeben. Weitere Entwicklungen werden darin weder ausgeschlossen noch eingeschränkt. Bei der Betrachtung der Entwicklung eines Endlagersystems über einen großen Zeitraum gelangt man unausweichlich zu plausiblen und wahrscheinlichen Verzweigungsmöglichkeiten, die eine Entscheidung für den einen oder anderen Entwicklungsweg im Sinne der Erwartungshaltung abverlangen. Die

Entscheidung hängt dann vom jeweiligen Betrachter bzw. Gruppe von Betrachtern ab. Die Beschreibung der erwarteten Entwicklung der Standorte ist daher subjektiv, hat jedoch keinen großen Einfluss auf das Endergebnis, da die erwartete Entwicklung zum Systemverständnis beitragen soll und als Referenzfall für die fachliche Diskussion herangezogen wird ohne sich entscheidend auf die Ableitung von Szenarien auszuwirken.

Es ist jedoch vorstellbar, dass die erwartete Entwicklung bereits Prozesse bzw. Umstände berücksichtigt oder in der Erwartungshaltung ausschließt, die nicht mehr bzw. doch in der Ableitung von Szenarien berücksichtigt werden müssen. Ein Beispiel hierzu wäre die Erwartungshaltung, dass bereits ein Anteil an anfänglich defekten Behältern vorliegt. Dieses Merkmal braucht dann nicht mehr gesondert in der Ableitung von Szenarien berücksichtigt werden. Unberührt davon bleibt jedoch, die mögliche Parametervariation hinsichtlich des Anteils anfänglicher defekter Behälter.

### Funktionsanalyse

In die Funktionsanalyse fließt eine Reihe von Subjektivitäten ein, die einen entscheidenden Einfluss, sowohl auf das Ergebnis der Untersuchung selbst als auch auf die Ableitung von Szenarien und damit letztendlich auf die übergeordnete Zielstellung eines Vergleiches von Endlagerstandorten, haben. Die Funktionsanalyse setzt auf die in Kapitel 3 erstellten Datengrundlagen auf, die auch unter dem Einfluss subjektiver Einschätzungen entstanden sind. Das gleiche gilt für die Abarbeitung der Funktionsanalyse, die jeweils auf vorherige Arbeitsschritte und deren Ergebnisse, die unter subjektiven Einflüssen gewonnen wurden, aufbaut.

Die Hauptquellen für subjektive Einflüsse in der Funktionsanalyse sind im Folgenden aufgeführt:

- Bei der Untersuchung
  - welche FEP auf welche SF wirken (s. Kapitel 5.1).
  - einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung von Sicherheitsfunktionen (s. Kapitel 5.2).
  - von möglichen Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen von SF untereinander (s. Kapitel 5.3).

Hinsichtlich der Funktionsanalyse ist zu konstatieren, dass die Durchführung zwar systematisch nach den formulierten Arbeitsschritten erfolgen kann, jedoch aufgrund der großen Anzahl an SF und der noch größeren Anzahl an zu berücksichtigenden FEP einen hohen Aufwand erfordert. Darüber hinaus ist in Bezug auf die Analyse eine große Bandbreite von Fachdisziplinen betroffen, die die Einbeziehung von verschiedenen Experten bzw. Expertenteams erfordert. Neben dem hohen fachlichen Anspruch steht hier vor allem die Herausforderung den Ablauf derart zu koordinieren und zu organisieren, dass die getroffenen Entscheidungen nicht nur begründet darzustellen sind sondern auch in der Abfolge der Analyse im Sinne eines nachvollziehbaren und transparenten Prozesses detailliert festgehalten werden.

### Ableitung von Szenarien

Die in Kapitel 6 beschriebene Vorgehensweise für die Ableitung von Szenarien wird entlang der verschiedenen Schritte von einer Reihe subjektiver Einflüsse begleitet sein. Darüber hinaus setzt die Methodik auf eine Basis auf, die wiederum bei ihrer Generierung subjektiver Einflüsse unterlegen war. Zu nennen sind hier vor allem die Datengrundlagen zu den FEP, deren Zuordnung zu Systemkomponenten und den Sicherheitsfunktionen sowie die Funktionsanalyse.

Die hinzukommenden subjektiven Einflüsse resultieren aus der fachlichen Interpretation der Ergebnisse der Funktionsanalyse gespiegelt an standortspezifischen Gegebenheiten und der Ableitung von Szenarien hinsichtlich einer realistischen bzw. vorstellbaren Möglichkeit einer Initiierung unter Einbeziehung der für eine Radionuklidfreisetzung erforderlichen Bedingungen.

Mögliche Fehleinschätzungen, Fehlinterpretationen usw. können sich auf das Arbeitsergebnis und damit auch auf den angestrebten Vergleich auswirken.

Auch hierbei ist die detaillierte Dokumentation der Ergebnisinterpretation sowie weiterer Untersuchungen bei einer späteren Anwendung der Vergleichsmethodik im Sinne eines nachvollziehbaren und transparenten Prozesses unerlässlich.

### Anmerkungen

Abschließend werden einige Anmerkungen im Zusammenhang mit subjektiven Einflüssen im Rahmen der Szenarientwicklung gegeben:

- Rahmenvorgaben sind derart festzulegen, dass sie keinen Einfluss auf den Ausgang des Ergebnisses hinsichtlich des angestrebten Vergleiches von verschiedenen Endlagersystemen haben.
- Die Reduzierung von subjektiven Anteilen steht in dem Kontext relevante Entscheidungen auf einer Reihe von unabhängig voneinander getroffenen Einschätzungen und begründeten Meinungen vorzunehmen.
- Bei der Entwicklung von Szenarien ist eine Reihe von subjektiven Entscheidungen zu treffen. Diese Subjektivität bei der Entscheidungsfindung erfordert zur Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit einer Sicherheitsanalyse die detaillierte Dokumentation der Entscheidungsprozesse.

### Festlegung von Szenarien

In Kapitel 6.3 wurde die Notwendigkeit einer Festlegung von Szenarien im Vorfeld der durchzuführenden systematischen Ableitung von Szenarien beschrieben. Im Folgenden werden allgemeine Aspekte aufgezeigt, die bei einer Festlegung von Szenarien aber auch bei Annahmen, Randbedingungen, Vereinfachungen usw. sowie nicht ein-zubeziehender Phänomene Berücksichtigung finden sollten:

Mit dem Vorhaben VerSi ist die Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Durchführung von vergleichenden Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen und unterschiedlichen Endlagerkonzepten verbunden.

Der Vergleich setzt voraus, dass beide Standorte gleichermaßen die Genehmigungsvoraussetzungen erfüllen. Abweichungen davon würden entweder einen oder beide Standorte als potenziellen Endlagerstandort ausschließen und damit einen Vergleich hinfällig machen. Ein Vergleich für VerSi bedeutet daher Abwägungskriterien zu finden, die nicht die Abfrage der bereits vorauszusetzenden Langzeitsicherheit der Standorte im Fokus haben sondern eher auf die Robustheit, Sicherheitsreserven, Relevanz und Unsicherheiten der zu betrachtenden Endlagersysteme bzw. ihrer Sicherheitsfunktionen abheben.

Für das vorliegende Vorhaben aber auch für das Verbundvorhaben VerSi wird es unvermeidlich sein, Annahmen und Festlegungen zu treffen. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. So führen mangelnde Kenntnisse zu bestimmten Phänomenen, komplexe

abzubildende Vorgänge, wechselwirkende sowie Einfluss nehmende Prozesse oder Faktoren oftmals zur Vorgabe von Festlegungen, Randbedingungen und Annahmen.

Die zugrunde zulegenden Annahmen und Festlegungen haben derart zu erfolgen, dass für die betrachteten Standorte die Genehmigungsvoraussetzungen nicht in Frage gestellt werden und darüber hinaus eine Bevorzugung oder Benachteiligung eines Standortes im Sinne der angestrebten Vergleichsmethodik auszuschließen ist. Die Begründung hierzu liefert die o. g. Zielsetzung und der vorauszusetzende umspannende Rahmen des Verbundvorhabens VerSi.

Andererseits wird sich der Vergleich auf Aussagen zur Robustheit und Sicherheitsreserven abstützen. Insbesondere Fragestellungen, die sich auf das Systemverhalten zur Einschätzung der Robustheit beziehen, werden Festlegungen und Annahmen unterworfen sein, die möglicherweise an realistische Grenzen stoßen bzw. diese überschreiten. Jedoch sollten die Annahmen und Festlegungen dabei nicht so abwegig sein, dass dadurch a priori eine Zerstörung des Endlagersystems impliziert wird.

## **8 Zusammenfassung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse zum Vorhaben 3607R02580 in Bezug auf die Entwicklung einer Methodik zur Ableitung von Szenarien. Die beschriebenen Arbeiten bauen auf den Entwicklungen und Ergebnissen des 1. Zwischenberichtes vom April 2008 und des 2. Zwischenberichtes vom Dezember 2008 auf und stellen damit eine Fortführung der Arbeiten zur Szenarienentwicklung dar.

Das Vorhaben 3607R02580 reiht sich ein in eines der insgesamt vier Teilvorhaben zum Verbundvorhaben VerSi. Die übergeordnete Zielsetzung von VerSi ist die Entwicklung einer Methodik, die einen Standortvergleich von Endlagern in unterschiedlichen geologischen Formationen erlaubt. Die Zielsetzung des vorliegenden Vorhabens ist eng an die genannte übergeordnete Zielsetzung geknüpft und beinhaltet einerseits die Erarbeitung einer systematischen Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien und andererseits die Bereitstellung einer soliden Datengrundlage als Referenz für die zu entwickelnde Vergleichsmethodik.

Der Bericht beschreibt die nach einer entwickelten methodischen Vorgehensweise durchgeführten Arbeiten zu den erforderlichen Datengrundlagen und den getroffenen Festlegungen und konzeptionellen Arbeiten zur Ableitung von Szenarien. Weiterhin beinhaltet der Bericht Ausführungen zu den einzelnen Schritten der Vorgehensweise, der getroffenen Festlegungen und Rahmenbedingungen sowie den damit verbundenen subjektiven Einflüssen, die zur Beurteilung eines Vergleiches von Standorten eine nicht zu vernachlässigende Komponente darstellen.

Die durchgeführten Arbeiten zu den erforderlichen Datengrundlagen beinhalten die Aufstellung und Einteilung von Systemkomponenten, wie z. B. Abfallbehälter, Einlagerungsbereich und Wirtsgestein, und deren Beschreibung als verknüpfendes Element für die weiteren Datengrundlagen den FEP und den Sicherheitsfunktionen. Weiterhin beziehen sich die durchgeführten Arbeiten auf die Ermittlung einer FEP Datengrundlage unter Einbindung einer FEP Ausgangsliste und der Verifizierung dieser Liste mit vorliegenden externen FEP Datengrundlagen, deren Einengung auf möglicherweise relevante FEP sowie schließlich die Zuordnung dieser FEP zu den Systemkomponenten. Darüber hinaus wurde eine Datengrundlage zu den Sicherheitsfunktionen aus vorliegenden Quellen zusammengestellt und daraus eine Auswahl bzw. Festlegung von wesentlichen Sicherheitsfunktionen vorgenommen.

Die Vorgehensweise beinhaltet zudem die Beschreibung der erwarteten Entwicklung für die im Verbundvorhaben VerSi zugrunde liegenden Endlagersysteme. Die Beschreibung erfolgte entlang der aufgestellten Systemkomponenten und eingeteilter Zeitphasen vom Zeitpunkt des Verschlusses der Endlager bis zum Nachweiszeitraum.

Ein weiteres wesentliches Element der Vorgehensweise ist mit der Durchführung einer Funktionsanalyse verbunden. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde dargelegt und beispielhaft für ausgewählte Sicherheitsfunktionen demonstriert, welche Einzelschritte in der Funktionsanalyse gefordert und welche Untersuchungen dahingehend vorzunehmen sind. Die Hauptbestandteile der Funktionsanalyse beinhalten die Untersuchung, welche FEP auf welche Sicherheitsfunktion wirken, die Analyse bzw. Diskussion einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung von Sicherheitsfunktionen und die Betrachtung von möglichen Abhängigkeiten bzw. Wechselwirkungen von Sicherheitsfunktionen untereinander. Die Funktionsanalyse machte deutlich, dass sich die Sicherheitsfunktionen weitgehend isoliert von anderen Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems untersuchen und diskutieren lassen. Der Vorteil der daraus resultiert, liegt in der Möglichkeit

die Untersuchung der Sicherheitsfunktionen zu fokussieren und der damit verbundenen Überschaubarkeit der durchzuführenden Arbeiten.

In der Ableitung von Szenarien erfolgten die Darstellung der Synthese der Arbeitsergebnisse aus den vorangegangenen Schritten sowie die Einbeziehung von getroffenen Vereinbarungen und Festlegungen. Neben der Beschreibung der erwarteten Entwicklung waren das vor allem die Ergebnisse aus der Zusammenstellung der Datengrundlagen und der Funktionsanalyse. Die Ableitung von Szenarien wurde unter Einbeziehung der beispielhaft durchgeführten Funktionsanalyse und standortspezifischer Gegebenheiten illustrativ vorgenommen.

Mit der beispielhaften Anwendung der systematischen Vorgehensweise wurde erstmalig gezeigt, dass durch die Festlegung und Diskussion von Sicherheitsfunktionen eine Entwicklung von Szenarien betrieben werden kann. Darüber hinaus ist die Methodik nicht an bestimmte Endlagerkonzepte und Standortgegebenheiten gebunden. Weiterhin erlaubt die Methodik bei der Anwendung bis zu einem gewissen Grad ohne standortspezifische Details auszukommen. Allerdings belegt die Anwendung der Methodik auch, dass der Aufwand für eine umfassende Szenarientwicklung signifikant ist.

Die notwendigerweise festzulegenden Szenarien für das parallel durchzuführende Vorhaben WS 2044 wurden abschließend diskutiert. Die Diskussion untermauerte die Aussage, dass sich die festgelegten Szenarien aus der umfassenden Anwendung der erarbeiteten systematischen Vorgehensweise bestimmen lassen. Außerdem lässt die aufgrund der fast parallelen Laufzeiten der Vorhaben resultierende Vorgehensweise durchaus den Schluss zu, dass die beiden Verfahren eines sog. Bottom-up und Top-down Ansatzes sich möglicherweise zu einem Mischansatz für die Entwicklung von Szenarien kombinieren lassen.

Abschließend erfolgt in dem vorliegenden Bericht eine Beschreibung von nicht vermeidbaren subjektiven Einflüssen und deren mögliche Auswirkung auf die Zielsetzung dieses Vorhabens entlang der durchgeführten Arbeitsschritte.

## 9        **Literatur**

- /AKE 02/    Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, AkEnd, Dezember 2002
- /AND 05/    ANDRA, Dossier 2005 Argile, Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site, Synthesis, December 2005
- /APP 06/    Appel, D., Kreuzsch, J.  
Das Mehrbarriersystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Salzstock, Hannover, Februar 2006
- /APP 07/    Appel, D.; Kreuzsch, J.  
Grundlagen der Methodik und Anforderungen bei der vergleichenden Bewertung von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen, Interner Arbeitsbericht zu Anforderungen an den Standortvergleich, UA 2742 im Vorhaben 3607R02589, Dezember 2007
- /ATW 08/    Arbeitskreis „Szenarientwicklung“  
Position des Arbeitskreises „Szenarientwicklung“: Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen, atw 53. Jg. (2008) Heft 8/9 – August/September
- /BAU 91/    Bauer, G.  
Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren? –Zbl. Geol. Paläontol., Teil 1, Heft 4; Stuttgart.,(1991)
- /BFS 07/    Endlagerung Radioaktiver Abfälle Als Nationale Aufgabe, BfS, Salzgitter, 2007
- /BFS 08/    Abschätzung von Lösungsvolumina im Hauptanhydrit im 200-m-Umkreis um den EB1 des Erkundungsbergwerkes Gorleben, Stellungnahme für VERSI, November 2008

- /BGR 01/ Bundesgesellschaft für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):  
Projekt Gorleben: Zusammenstellung von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (ZEP) als Basis für die Ermittlung von Szenarien (Standort Gorleben – Bericht zum Arbeitspaket 9G 261 2100.-  
Hannover, Dezember 2001.
- /BGR 02/ Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben, BGR, Fachbericht  
Projekt Gorleben, April 2002
- /BGR 07/ Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland, Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen, BGR, April 2007
- /BOR 08/ Bornemann, O et al.  
Standortbeschreibung Gorleben Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars, Hannover, (2008)
- /BRA 08/ Bracke G., Beuth T., Fischer-Appelt K., Larue J., Navarro M.  
Safety Functions derived from Geochemistry for Safety Analysis of Final Disposal of High-Level Radioactive Waste, in: Merkel B., Hasche-Berger A. (Eds.), Uranium Mining and Hydrogeology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 771-778, ISBN 978-3-540-87745-5, 2008
- /COL 05/ Heimer, S.; Niemeyer, M.  
Charakterisierung von Barrierenwirksamkeiten im Mehrbarrierensystem für Endlager: Technische Barrieren und einschlusswirksamer Gebirgsbereich  
Bericht zu TA 1, Zusammenstellung und Bewertung von Größen, die die Barriereigenschaften geologischer Barrieren charakterisieren, Bericht 3470/03, Colenco, September 2005
- /COL 09/ Prozesse und Modellkonzepte Tonstein, WS 2044 – VerSi, AF-Colenco AG, Bericht 1313/04, April 2009
- /DBE 98/ Filbert, W.; Engelmann, H. J.  
Aktualisierung des Konzeptes „Endlager Gorleben“, Abschlussbericht, DBE, März 1998

- /DUP 00/ Duphorn, K.  
Aktuelles zum Gorleben-Moratorium und zu den Projekten Gorleben-Süd und –Nord. Loccumer Protokolle 02/00, Loccum, 2000
- /GRS 98a/ Röhlig, K. J.  
Zur räumlichen Variabilität an Standorten für Endlager radioaktiver Abfälle, GRS – A – 2622, GRS, Oktober 1998
- /GRS 98b/ Baltés, B.; Röhlig, K. J.  
Szenarienanalysen im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle, GRS – A – 2633, GRS, November 1998
- /GRS 00/ Röhlig, K. J.  
The UK Nirex Approach to Scenario Analysis  
Summary and Conclusions of a Workshop held in Köln on November 22-26, 1999, Vorhaben SR 2337, GRS – A – 2772, GRS, Januar 2000
- /GRS 04/ Lambers, L.  
Szenarienanalysen im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle  
Fortschreibung der Arbeiten im Rahmen des Vorhabens SR 2451, GRS – A – 3171, GRS, Februar 2004
- /GRS 07/ Baltés, B.; Röhlig, K. J.; Kindt, A.  
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen - Entwurf der GRS-, Vorhaben SR 2523; GRS – A – 3358, GRS, Januar 2007
- /GRS 08a/ Fischer-Appelt, K.; Beuth, T.  
Durchgeführte Arbeiten zum Aufbau der FEP Datenbasis und zur methodischen Vorgehensweise  
Zwischenbericht zu den Teilvorhaben 3607R02580 "Szenariientwicklung" und „Evaluierung“ 3607R02589, GRS, April 2008

- /GRS 08b/ Beuth, T, Bracke, G.  
Darstellung der Arbeitsgrundlage zur Ableitung von Szenarien  
2. Zwischenbericht zum Teilvorhaben 3607R02580 „Szenarientwicklung“, GRS, Dezember 2008
- /GRS 08c/ Beuth, T.  
Zusammenstellung von Betrachtungsfällen aus dem Projekt Opalinuston (Entsorgungsnachweis) der NAGRA und Relevanzabschätzungen  
Interner Arbeitsbericht zum Teilvorhaben 3607R02580 Szenarientwicklung, GRS, Juni 2008
- /GRS 08d/ Larue, J; Peiffer, F.  
Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes  
Zwischenbericht zum Vorhaben 3607R02538, GRS, Januar 2008
- /GRS 08e/ Bracke, G.  
Sicherheitsfunktionen oder –reserven im Nahfeld aus geochemischer Sicht (Entwurf), Vorhaben 3605R02548 Verfolgung und Bewertung der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern, GRS, Oktober 2008
- /GRS 08f/ Peiffer, F.  
Endlagerkonzept in Tonstein, Zwischenbericht zum Vorhaben 3607R02538 (Entwurf), GRS, November 2008
- /GRS 08g/ Rübél, A.  
Festlegung des Endlagerkonzepts und der für die langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen benötigten Eingangsdaten für das Endlagerkonzept im Salz, GRS Notiz, GRS, Juni 2008
- /GRS 09/ Rübél, A.; Mönig, J.  
Prozesse und Modellkonzepte Salz, GRS, Vorhaben WS 2044, Dezember 2009
- /GSF 04/ GSF FORSCHUNGSZENTRUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT:  
FORSCHUNGSBERGWERK ASSE, Szenarientwicklung Nahfeld,  
Colenco Bericht 3301/02, Juli 2004

- /IAE 07/ IAEA SAFETY GLOSSARY,  
TERMINOLOGY USED IN NUCLEAR SAFETY AND RADIATION  
PROTECTION, 2007 EDITION, IAEA, Wien 2007
- /ISI 08/ Vorhaben ISIBEL, GRS, BGR, DBETec  
Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche  
Bewertung von Endlagern für HAW, ISIBEL, FEP Katalog, April 2008
- /KEL 09/ Keller, Sigfried; Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die  
Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfäl-  
len in Norddeutschland, BGR, Hannover, August 2009
- /KLI 07/ Klinge, H. et al., Standortbeschreibung Gorleben Teil 1: Die Hydrogeologie  
des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben,- Geol. Jb., C 71; 59 Abb.,4  
Tab, 1 Anl., Hannover, 2007.
- /LOU 79/ Louis, H.; Fischer, K.; Lehrbuch der Allgemeinen Geographie; Allgemeine  
Geomorphologie; ISBN 3-11-007103-7, 1979
- /NAG 02/ NAGRA; TECHNICAL REPORT 02-05; Project Opalinus Clay; Safety Re-  
port; Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified highlevel  
waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis); De-  
cember 2002
- /NAG 07/ NAGRA  
FEP Screening Report, Arbeitsbericht NAB 07-38, NAGRA, Dezember  
2007
- /NEA 92/ OECD/NEA  
Systematic Approaches to Scenario Development, Safety Assessment of  
Radioactive Waste Repositories, Paris, 1992
- /NEA 06a/ OECD/NEA  
NEA International FEP Database: Version 2.1, November 2006
- /NEA 06b/ OECD/NEA  
CONSIDERATION OF TIMESCALES IN POST-CLOSURE SAFETY OF  
GEOLOGICAL DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE, November 2006

- /OLA 80/ Olander, D. R. et al.; Thermal Gradient Migration of Brine Inclusions in Salt; Technical Report; Office of Nuclear Waste Isolation; ONWI-208; Berkeley; October 1980
- /OLA 84/ Olander, D. R.; A Study of Thermal-Gradient-Induced Migration of Brine Inclusions in Salt; Final Report; Office of Nuclear Waste Isolation, ONWI-538, Columbus, August 1984.
- /PEI 08/ Peiffer, F.  
Verbundprojekt VerSi, Teilprojekt 3607R02538, Bearbeitung der Offenen Punkteliste (OP Liste), Veranlassungen aus Fachsitzungen, GRS, Dezember 2008
- /POS 07/ Posiva Oy  
Integrated Project PAMINA, WP1.1 Safety functions, 2007
- /SCK 07/ SCK•CEN,  
Integrated Project PAMINA, M3.1.5 Proposed methodology for the identification of altered evolution scenarios based on safety functions, SCK•CEN, August 2007
- /SKB 06/ SKB  
Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-Can project, SKB, October 2006
- /VER 08a/ Vorhaben VerSi, BfS, GRS, COLENCO  
Gesprächsnotiz VerSi-Workshop 23. - 25.06.2008
- /VER 08b/ Vorhaben VerSi, BfS, GRS, COLENCO  
Gesprächsnotiz VerSi-Fachgespräch BfS 19.08.2008 und  
Gesprächsnotiz VerSi-Fachgespräch BGR 20.08.2008
- /VER 09/ Vorhaben VerSi, BfS, GRS, COLENCO  
Gesprächsnotiz VerSi-Fachgespräch GRS 12.11.2009

**10 Anhang**

Anhang 1: FEP-Datengrundlage

HG_NR	Hauptgruppe	UG_NR	Untergruppe	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	FEP_ART	Bemerkung	Bezug S, T
1	Natürliche Phänomene	1_1	Extraterrestrisch	1_1_1	Meteoriteneinschlag	E		ST
1	Natürliche Phänomene	1_1	Extraterrestrisch	1_1_2	Solareinstrahlung	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_1	Kriechen des Gesteins	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_2	Diagenese	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik	P		S
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	E		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Klufsystemen)	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_7	Metamorphose	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_8	Plattentektonik	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_9	Gesteinsheterogenitäten	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_10	Seismizität (Erdbeben)	E		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_11	Magmatismus, Vulkanismus	E		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_14	Gebirgsbildung (Orogenese)	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_15	Grabenbildung (Taphrogenese)	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_2	Geologisch	1_2_16	Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften	F	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_1	geringfügige klimatische Veränderungen	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_2	Klimatische Variabilität	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_3	Extremer Niederschlag	E		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_4	Kaltzeit (Glazial)	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_6	Niederschlag, Temperatur Boden-Wasser-Haushalt	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_3	Klimatologisch	1_3_9	Warmzeiten (Interglazial)	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_4	Geomorphologisch	1_4_1	Rinnenbildung	E		ST
1	Natürliche Phänomene	1_4	Geomorphologisch	1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_4	Geomorphologisch	1_4_3	Denudation (flächenhafte Abtragung)	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_4	Geomorphologisch	1_4_4	Sedimentation, Sedimenttransport	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_4	Geomorphologisch	1_4_5	Subrosion	P		S
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_1	Änderungen des Flusslaufs, Wasserspiegel im See	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_2	Flutung	E		ST
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_3	Grundwasserbedingungen	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_4	Grundwasseraustritt	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_5	Grundwasserfluss	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_6	Grundwassererneuerung	F		ST

Anhang 1: FEP-Datengrundlage

HG_NR	Hauptgruppe	UG_NR	Untergruppe	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	FEP_ART	Bemerkung	Bezug S, T
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_7	Natürliche thermische Effekte	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_8	Effekte der Subrosion	F		S
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_9	Sonstige hydraulische Prozesse	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_5	Hydrologisch	1_5_10	Lösungszufluss, Migration von Lösungen	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_1	Advektion, Konvektion, Dispersion	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_2	Diffusion	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_3	Verdünnung	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_4	Gasinduzierter Transport	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_5	Matrixdiffusion	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_6	Mehrphasenfluss	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_7	Onsager Prozesse	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_6	Transport	1_6_8	Sonstige Transportprozesse	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_1	Akkumulation im Boden, organische Ablagerung	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_2	Chemische Gleichgewichtsreaktion	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_3	Radionuklidtransport	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_4	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_5	Ausfällung von Radionukliden	F	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_6	Sorption und Desorption	F	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_7	Komplexbildner	F	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_8	Kolloidaler Radionuklidtransport	P	neu aufgenommen	ST
1	Natürliche Phänomene	1_7	Geochemisch	1_7_9	Auflösung	P	neu aufgenommen	S
1	Natürliche Phänomene	1_8	Ökologisch	1_8_1	Chemische Umwandlung	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_8	Ökologisch	1_8_2	Entwicklung der Biosphäre	P		ST
1	Natürliche Phänomene	1_8	Ökologisch	1_8_3	Mikrobielle Wechselwirkungen	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_8	Ökologisch	1_8_4	Aufnahme von Radionukliden von Tier, Pflanze und Wurzel	F		ST
1	Natürliche Phänomene	1_8	Ökologisch	1_8_5	Artenevolution	P	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_1	Behälterdefekte	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_2	Behälterausfall	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_3	Materialdefekte	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_4	Verminderte Qualität bei der Konstruktion	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_5	Versagen der Abdichtung	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_6	Änderungen des Spannungsfeldes	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_7	Thermische Effekte	F		ST

Anhang 1: FEP-Datengrundlage

HG_NR	Hauptgruppe	UG_NR	Untergruppe	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	FEP_ART	Bemerkung	Bezug S, T
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_8	Unentdeckte geologische Eigenschaften	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_9	Unentdeckte Eingriffe in der Vergangenheit	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_10	Generierung von Auflockerungszonen (EDZ)	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_11	Auflösung der Glasmatrix, Brennstoffmatrix, Korrosion	P	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_12	Verdunstung/ Kondensation von Wasser	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_13	Eigenschaften der Komponenten/ Materialien	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_1	Auslegung und Konstruktion	2_1_14	Zusammensetzung der Komponenten/ Materialien	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_2	Betrieb und Stilllegung	2_2_1	Flutung des Endlagers während des Betriebes	E		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_2	Betrieb und Stilllegung	2_2_2	Unzureichende Versatzkompaktion (Hohlraumvolumen)	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_2	Betrieb und Stilllegung	2_2_3	Verminderte Verschlussfunktion	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_2	Betrieb und Stilllegung	2_2_4	Eingebrachte Lösungen	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_1	Gewinnungsbohrung	E		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_2	Erkundungsbohrung (Exploration)	E		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_3	Grundwasserentnahme/ Grundwasserneubildung	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_4	Injektion von Fluiden	E		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_5	Gewinnungsbergbau	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_6	Untergrundkonstruktion	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_7	Änderung des Wasserspiegels	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_8	Wiederaufsättigung	P	neu aufgenommen	T

Anhang 1: FEP-Datengrundlage

HG_NR	Hauptgruppe	UG_NR	Untergruppe	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	FEP_ART	Bemerkung	Bezug S, T
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_3	Untertägige Aktivitäten nach Verschluss	2_3_9	Aufgabe des Endlagers ohne Versatz	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_4	Aktivitäten an der Oberfläche nach Verschluss	2_4_1	Veränderung der Boden-, Oberflächenwasserchemie	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_4	Aktivitäten an der Oberfläche nach Verschluss	2_4_2	Vom Menschen verursachte Klimaänderungen (Treibhauseffekt)	P		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_4	Aktivitäten an der Oberfläche nach Verschluss	2_4_3	Änderung der Flächennutzung	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_4	Aktivitäten an der Oberfläche nach Verschluss	2_4_4	Bewässerung	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_4	Aktivitäten an der Oberfläche nach Verschluss	2_4_5	Informations- und Wissensverlust	F		ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_4	Aktivitäten an der Oberfläche nach Verschluss	2_4_6	Menschliche Entwicklung und Aktivitäten	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_5	Standortsuche und Standortuntersuchungen	2_5_1	Undetektierbare Merkmale	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_5	Standortsuche und Standortuntersuchungen	2_5_2	Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen	F	neu aufgenommen	ST
2	Anthropogen induzierte Phänomene	2_5	Standortsuche und Standortuntersuchungen	2_5_3	Standorterkundung	F	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_1	Thermisch	3_1_1	Dehydratation von Salzmineralien	F		S
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_1	Thermisch	3_1_2	Unterschiedliches elastisches Ansprungsverhalten	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_1	Thermisch	3_1_3	Induzierte chemische Änderungen	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_1	Thermisch	3_1_4	Induzierte hydrologische Änderungen	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_1	Thermisch	3_1_5	Nicht-elastisches Ansprungsverhalten	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_1	Zelluloseartige Zerlegung	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_2	Veränderung des Puffer-/Versatzmaterials	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_3	Gasentwicklung	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_4	Auslaugung	P		S
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_5	Metallkorrosion	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_6	Mikrobielle Effekte	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_7	Redox-Potenzial, pH	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_8	Zündfähige Gasgemische	F	neu aufgenommen	ST

Anhang 1: FEP-Datengrundlage

HG_NR	Hauptgruppe	UG_NR	Untergruppe	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	FEP_ART	Bemerkung	Bezug S, T
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_9	Gasspeicherung	F	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_10	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_12	Gasphasenbildung, Gasdruckaufbau	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_13	Speziation der Radionuklide	F	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_2	Chemisch	3_2_14	Wechselwirkung zwischen Abfallkategorien	F	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_1	Gebinde- und Behälterbewegung	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_2	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	E		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_3	Hohlraumkonvergenz	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_4	Versprödung, Rissbildung	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_5	Bruch- / Rissbildung	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_6	Wiederanpassung des Wirtsgesteins an Trennfugen	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_7	Vorliegen und Verbindung von Resthohlräumen	F	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_8	Volumenänderung	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_3	Mechanisch	3_3_9	Positionsänderung (Verschiebung der Lage)	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	F		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_3	Radioaktiver Zerfall/ Anstieg der Konzentration an Zerfallsprodukten und der Aktivität	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_4	Radiolyse	P		ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_5	Kritikalität	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_6	Aufteilung (Einteilung) des Inventars (Modellzwecke)	F	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_8	Strahlungsinduzierte Aktivierung	P	neu aufgenommen	ST
3	Abfall und Endlager induzierte Phänomene	3_4	Radiologisch	3_4_9	Inventar, Radionuklide, Mobilisierung, Quellterm	F	neu aufgenommen	ST

Anhang 2: Ausweisung von möglicherweise relevanten - und auszuschließende FEP in der FEP-Datengrundlage

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Möglicherweise relevant	Quelle Relevanz	Ausgeschlossen	Quelle Ausschluss
1_1_1	Meteoriteneinschlag			22	2
1_1_2	Solareinstrahlung			21	7
1_2_1	Kriechen des Gesteins	X	1; 2; 3		
1_2_2	Diagenese			12	5
1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik	X	2; 3		
1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	X	2; 3		
1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	X	2		
1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Klufsystemen)	X	2		
1_2_7	Metamorphose			12	5
1_2_8	Plattentektonik			12	5
1_2_9	Gesteinsheterogenitäten	X	2		
1_2_10	Seismizität (Erdbeben)			23	6
1_2_11	Magmatismus, Vulkanismus	X	2	23	6
1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	X	1; 3		
1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	X	2; 3; 4		
1_2_14	Gebirgsbildung (Orogenese)			12	5
1_2_15	Grabenbildung (Taphrogenese)			12	5
1_2_16	Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften	X	2; 3; 4		
1_3_1	geringfügige klimatische Veränderungen			21	7
1_3_2	Klimatische Variabilität	X	2; 4		
1_3_3	Extremer Niederschlag				
1_3_4	Kaltzeit (Glazial)	X	2; 4		
1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)	X	2; 4		
1_3_6	Niederschlag, Temperatur Boden-Wasser-Haushalt			21	7
1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")	X	2		
1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem				
1_3_9	Warmzeiten (Interglazial)				
1_4_1	Rinnenbildung	X	2; 7		
1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung	X	3		
1_4_3	Denudation (flächenhafte Abtragung)	X	1; 2; 3		
1_4_4	Sedimentation, Sedimenttransport				
1_4_5	Subrosion	X	2; 3		
1_5_1	Änderungen des Flusslaufs, Wasserspiegel im See				
1_5_2	Flutung	X	2		
1_5_3	Grundwasserbedingungen				
1_5_4	Grundwasseraustritt				
1_5_5	Grundwasserfluss	X	1; 2; 3; 4		
1_5_6	Grundwassererneuerung				

Anhang 2: Ausweisung von möglicherweise relevanten - und auszuschließende FEP in der FEP-Datengrundlage

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Möglicherweise relevant	Quelle Relevanz	Ausgeschlossen	Quelle Ausschluss
1_5_7	Natürliche thermische Effekte			21	2
1_5_8	Effekte der Subrosion	X	3		
1_5_9	Sonstige hydraulische Prozesse			22	2
1_5_10	Lösungszufluss, Migration von Lösungen	X	2; 3	22	2
1_6_1	Advektion, Konvektion, Dispersion	X	1		
1_6_2	Diffusion	X	1; 2; 3; 4		
1_6_3	Verdünnung				
1_6_4	Gasinduzierter Transport	X	1		
1_6_5	Matrixdiffusion	X	1; 3		
1_6_6	Mehrphasenfluss	X	1		
1_6_7	Onsager Prozesse				
1_6_8	Sonstige Transportprozesse				
1_7_1	Akkumulation im Boden, organische Ablagerung				
1_7_2	Chemische Gleichgewichtsreaktion	X	3		
1_7_3	Radionuklidtransport	X	1; 2; 4		
1_7_4	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen	X	2; 3; 4		
1_7_5	Ausfällung von Radionukliden	X	1; 2		
1_7_6	Sorption und Desorption	X	1; 3; 4		
1_7_7	Komplexbildner	X	1; 2		
1_7_8	Kolloidaler Radionuklidtransport	X	2; 3		
1_7_9	Auflösung	X	2; 4		
1_8_1	Chemische Umwandlung	X	3		
1_8_2	Entwicklung der Biosphäre	X	2	24	7
1_8_3	Mikrobielle Wechselwirkungen	X	2		
1_8_4	Aufnahme von Radionukliden von Tier, Pflanze und Wurzel			24	7
1_8_5	Artenevolution			24	2
2_1_1	Behälterdefekte	X	1; 4		
2_1_2	Behälterausfall	X	1; 4		
2_1_3	Materialdefekte	X	2		
2_1_4	Verminderte Qualität bei der Konstruktion	X	2; 3; 4		
2_1_5	Versagen der Abdichtung	X	2; 3; 4		
2_1_6	Änderungen des Spannungsfeldes	X	2		
2_1_7	Thermische Effekte	X	2		

Anhang 2: Ausweisung von möglicherweise relevanten - und auszuschließende FEP in der FEP-Datengrundlage

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Möglicherweise relevant	Quelle Relevanz	Ausgeschlossen	Quelle Ausschluss
2_1_8	Unentdeckte geologische Eigenschaften			24	7
2_1_9	Unentdeckte Eingriffe in der Vergangenheit			24	7
2_1_10	Generierung von Auflockerungszonen (EDZ)	X	1; 2		
2_1_11	Auflösung der Glasmatrix, Brennstoffmatrix, Korrosion	X	1; 4		
2_1_12	Verdunstung/ Kondensation von Wasser	X	2		
2_1_13	Eigenschaften der Komponenten/ Materialien	X	2; 3; 4		
2_1_14	Zusammensetzung der Komponenten/ Materialien	X	4		
2_2_1	Flutung des Endlagers während des Betriebes			13	5
2_2_2	Unzureichende Versatzkompaktion (Hohlraumvolumen)				
2_2_3	Verminderte Verschlussfunktion	X	2; 3; 4		
2_2_4	Eingebrachte Lösungen	X	2		
2_3_1	Gewinnungsbohrung	X			
2_3_1	Erkundungsbohrung (Exploration)		3	11	5
2_3_2	Grundwasserentnahme/ Grundwasserneubildung	X	2; 3	11	5
2_3_3	Injektion von Fluiden			24	2
2_3_4	Gewinnungsbergbau	X	3	11	5
2_3_5	Untergrundkonstruktion	X	3	11	5
2_3_6	Änderung des Wasserspiegels	X	2; 3	11	5
2_3_7	Wiederaufsättigung			24	2
2_3_8		X	1		

Anhang 2: Ausweisung von möglicherweise relevanten - und auszuschließende FEP in der FEP-Datengrundlage

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Möglicherweise relevant	Quelle Relevanz	Ausgeschlossen	Quelle Ausschluss
2_3_9	Aufgabe des Endlagers ohne Versatz			23	7
2_4_1	Veränderung der Boden-, Oberflächenwasserchemie			24	2
2_4_2	Vom Menschen verursachte Klimaänderungen (Treibhauseffekt)			24	2
2_4_3	Änderung der Flächennutzung			24	2
2_4_4	Bewässerung			24	2
2_4_5	Informations- und Wissensverlust	X	3	11	5
2_4_6	Menschliche Entwicklung und Aktivitäten	X	3	24	2
2_5_1	Undetektierete Merkmale			24	2
2_5_2	Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen				
2_5_3	Standorterkundung	X	3		
3_1_1	Dehydration von Salzmineralien				
3_1_2	Unterschiedliches elastisches Anspracheverhalten				
3_1_3	Induzierte chemische Änderungen	X	2; 3		
3_1_4	Induzierte hydrologische Änderungen				
3_1_5	Nicht-elastisches Anspracheverhalten				
3_2_1	Zelluloseartige Zerlegung			21	7
3_2_2	Veränderung des Puffer-/Versatzmaterials	X	1; 2		
3_2_3	Gasentwicklung	X	1; 2		
3_2_4	Auslaugung	X	1; 2		
3_2_5	Metallkorrosion	X	1; 2		
3_2_6	Mikrobielle Effekte	X	1; 2		
3_2_7	Redox-Potenzial, pH	X	1; 2		
3_2_8	Zündfähige Gasgemische				

Anhang 2: Ausweisung von möglicherweise relevanten - und auszuschließende FEP in der FEP-Datengrundlage

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Möglicherweise relevant	Quelle Relevanz	Ausgeschlossen	Quelle Ausschluss
3_2_9	Gasspeicherung	X	1; 2; 3; 4		
3_2_10	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen	X	1; 2; 3; 4		
3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	X	1; 4		
3_2_12	Gasphasenbildung, Gasdruckaufbau	X	1; 2; 3		
3_2_13	Speziation der Radionuklide	X	1; 2; 4		
3_2_14	Wechselwirkung zwischen Abfallkategorien				
3_3_1	Gebinde- und Behälterbewegung	X	2		
3_3_2	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	X	2		
3_3_3	Hohraumkonvergenz	X	1; 2; 3		
3_3_4	Versprödung, Rissbildung	X	2		
3_3_5	Bruch- / Rissbildung	X	2		
3_3_6	Wiederanpassung des Wirtsgesteins an Trennfugen	X	1; 2; 3		
3_3_7	Vorliegen und Verbindung von Resthohlräumen	X	2		
3_3_8	Volumenänderung	X	2		
3_3_9	Positionsänderung (Verschiebung der Lage)	X	2		
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	X	2		
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	X	4		
3_4_3	Radioaktiver Zerfall/ Anstieg der Konzentration an Zerfallsprodukten und der Aktivität	X	1; 2		
3_4_4	Radiolyse	X	1; 2		
3_4_5	Kritikalität			23	2
3_4_6	Aufteilung (Einteilung) des Inventars (Modellzwecke)	X	1	25	7
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	X	2		
3_4_8	Strahlungsinduzierte Aktivierung				
3_4_9	Inventar, Radionuklide, Mobilisierung, Quellterm	X	1; 2; 4		

Anhang 3: Zuordnungsmatrix FEP zu Systemkomponenten

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Zuordnung zu Komponenten																
		A	FM	AP	AB	AG	VE	BE	ELB	WB	EB	EWG	EL	SV	WG	GU	ES	GS
1_2_1	Kriechen des Gesteins				2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	3		
1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik										2	1	2	2	1	1	2	3
1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)											1	1	1	1	1	1	1
1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)											1	1	1	1	1	1	1
1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Klufsystemen)							2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
1_2_9	Gesteinsheterogenitäten										1	1	1	1	1	1	1	1
1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)											2	2	2	1	1	1	1
1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten					3	3	2	3	2	1	1	2	2	1	1	1	1
1_2_16	Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften										1	1	1	1	1	1	1	1
1_3_2	Klimatische Variabilität														2	1	1	1
1_3_3	Extremer Niederschlag														2	1	1	1
1_3_4	Kaltzeit (Glazial)										2	2	2	1	1	1	1	1
1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)																	
1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")															2	1	1
1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem														2	1	1	1
1_3_9	Warmzeiten (Interglazial)															1	1	1
1_4_1	Rinnenbildung							3	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1
1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung															2	1	1
1_4_3	Denudation (flächenhafte Abtragung)																1	1
1_4_4	Sedimentation, Sedimenttransport																1	1
1_4_5	Subrosion														1	3		
1_5_1	Änderungen des Flusslaufs, Wasserspiegel im See																2	1
1_5_2	Flutung																2	1
1_5_3	Grundwasserbedingungen																1	1
1_5_4	Grundwasseraustritt																	1
1_5_5	Grundwasserfluss										1				1	1	1	1





Anhang 3: Zuordnungsmatrix FEP zu Systemkomponenten

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Zuordnung zu Komponenten																	
		A	FM	AP	AB	AG	VE	BE	ELB	WB	EB	EWG	EL	SV	WG	GU	ES	GS	
3_2_14	Wechselwirkung zwischen Abfallkategorien	1		1	1														
3_3_1	Gebinde- und Behälterbewegung				1														
3_3_2	Änderungen des in situ Spannungsfeldes			2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	
3_3_3	Hohlraumkonvergenz				3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
3_3_4	Versprödung, Rissbildung			1	1	1													
3_3_5	Bruch- / Rissbildung						1	1	1	1	1	1	1	1	1				
3_3_6	Wiederanpassung des Wirtsgesteins an Trennfugen						1	1	1	1	1	1	1	1	1				
3_3_7	Vorliegen und Verbindung von Resthohlräumen						1	1	1	1	1	1	1	1	1				
3_3_8	Volumenänderung						1	2	1	2	2	3	3	2	3				
3_3_9	Lageverschiebung Ausbauelemente													1					
3_4_1	Wärmeentwicklung, Temperaturentwicklung	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
3_4_3	Radioaktiver Zerfall/ Anstieg der Konzentration an Zerfallsprodukten und der Aktivität																		
3_4_4	Radiolyse	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte				1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	
3_4_8	Strahlungsinduzierte Aktivierung	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
3_4_9	Inventar, Radionuklide, Mobilisierung, Quellterm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				

Anhang 4: SF-Datengrundlage

Kenn_Nr	SK_Nr	SK_LFD_Nr	Systemkomponente	Sicherheitsfunktion	Beurteilungsgröße	Bewertungsmaßstab	Quelle
1	3	1	Abfallprodukt	Homogene Verteilung und Fixierung der Radionuklide in der Matrix			GRS
1	3	2	Abfallprodukt	Beständigkeit der Glasmatrix gegenüber Glaskorrosion	Glaskorrosionsrate	Niedrige Glaskorrosionsrate	GRS
1	3	3	Abfallprodukt	Lösungsbeständigkeit der Hüllrohre und der Brennstofftablets	Auflösungsrate	Niedrige Auflösungsrate	GRS
1	3	4	Abfallprodukt	Bildung von Sekundärphasen			GRS
1	3	5	Abfallprodukt	Lösungszusammensetzung			GRS
1	3	6	Abfallprodukt	Wasserstoffbildung			GRS
1	3	7	Abfallprodukt	Sorption an Korrosionsprodukten	Kd	größer 0	GRS
1	3	8	Abfallprodukt	Redoxpotenzial	Eh	reduzierend gegenüber U(IV)	GRS
2	4	1	Behälter	Behälterstandzeit mindestens 100.000 Jahre unter dem Einfluss der erwarteten Entwicklung und auf der Basis bekannter Ablaufprozesse im Endlager			Posiva
2	4	2	Behälter	Ausreichender Widerstand gegen mechanische Beanspruchung			Posiva
2	4	3	Behälter	Gewährleistung eines unterkritischen Zustandes			Posiva
2	4	4	Behälter	Abführung der Zerfallswärme und Abschwächung der Strahlung aus den abgebrannten Brennelementen			Posiva
2	4	5	Behälter	Keine schädlichen Auswirkungen auf andere Barrieren			Posiva
2	4	6	Behälter	Vorhandensein einer ausreichenden Korrosionsbarriere	Material- und Schichtdicke des Behälters	Kupferschicht > 0 m	SKB
2	4	7	Behälter	Ausreichender Widerstand gegen isostatische Beanspruchung	isostatischen Beanspruchung	Widerstand > isostatischen Beanspruchung	SKB
2	4	8	Behälter	Ausreichender Widerstand gegen Scherspannungen	Scherspannung	Bruchgrenze > Scherspannung	SKB
2	4	9	Behälter	Schutz des Abfallproduktes vor geomechanischen und geochemischen Einwirkungen			GRS
2	4	10	Behälter	Verhinderung eines Wasserzutritts bzw. einer Radionuklidfreisetzung			GRS
2	4	11	Behälter	Verminderung der Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfallprodukt			GRS
2	4	12	Behälter	Einstellung eines günstigen chemischen Milieus durch Korrosionsprodukte			GRS
2	4	13	Behälter	Radionuklidbindung an Korrosionsprodukten			GRS
2	4	14	Behälter	Ableitung der Zerfallswärme	Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ [J/(m s K)])		GRS
2	4	15	Behälter	Einschluss des Abfalls	Wandstärke des Behälters	$W_B > 0$	GRS
2	4	16	Behälter	Sorption an Korrosionsprodukten	Kd	größer 0	GRS

Anhang 4: SF-Datengrundlage

Kenn_Nr	SK_Nr	SK_LFD_Nr	Systemkomponente	Sicherheitsfunktion	Beurteilungsgröße	Bewertungsmaßstab	Quelle
3	17	1	Biosphere	Schutz der Menschheit und der Umwelt gegen die Freisetzung von toxischen Substanzen (Radionukliden und chemische Stoffe)			ANDRA, Dossier 2005 Argile
4	8	1	Einlagerungsbereiche, Strecken, Bohrlöcher	Geringe Ausbildung von Auflockerungszonen durch die Auffahrung uam.			GRS
4	8	2	Einlagerungsbereiche, Strecken, Bohrlöcher	Niedrige Radionuklidlöslichkeit	mol/l		GRS
5	12	1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	advektiver Transport kleiner als diffusiver Transport			GRS
5	12	2	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Ausprägung und Aufrechterhaltung eines geringen Diffusionsvermögens.	Diffusionskonstante	$D \leq 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$	GRS
5	12	3	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Der advektive Transport muss extrem gering sein.	Integraler Durchlässigkeitsbeiwert des Tonsteins	$k_f < 10^{-11} \text{ m/s}$	GRS
5	12	4	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	keine oder nur sehr geringe Freisetzung von Radionukliden aus dem EWG	Geringfügigkeitsbedingung		GRS
5	12	5	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Verhinderung bzw. Verzögerung von eindringenden Fluiden in die Einlagerungsbereiche			GRS
5	12	6	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	gute Ableitung der Zerfallswärme	Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ [J/(m s K)])		GRS
5	12	7	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	hohe Belastbarkeit gegenüber äußeren und inneren Temperaturschwankungen	Temperaturleitfähigkeit ( $a$ [m <sup>2</sup> /s])		GRS
5	12	8	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	hohes Rückhaltevermögen gegenüber Radionukliden	Sorptionkonstanten		GRS
5	12	9	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Schutz der geotechnischen Barrieren gegen äußere Einwirkungen			GRS
5	12	10	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Keine wasserführende Systeme			GRS
5	12	11	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Isolation der Radionuklide			GRS
5	12	12	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Ableitung der Zerfallswärme	Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ [J/(m s K)])		GRS
5	12	13	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Isolation	kein oder nur geringfügiger Stofftransport über die Systemgrenze	Teilchenstromdichte < Geringfügigkeitsgrenze	GRS
6	16	1	Endlagersystem	Isolation des radioaktiven Abfalls von der menschlichen Umwelt			NAGRA
6	16	2	Endlagersystem	Langzeit-Einschluss und radioaktiver Zerfall innerhalb des Endlagersystems			NAGRA
6	16	3	Endlagersystem	Abschwächung (Verminderung) von Freisetzungen in die Umwelt			NAGRA
6	16	4	Endlagersystem	Einhaltung der Schutzziele und der Isolationsanforderungen			GRS

Anhang 4: SF-Datengrundlage

Kenn_Nr	SK_Nr	SK_LFD_Nr	Systemkomponente	Sicherheitsfunktion	Beurteilungsgröße	Bewertungsmaßstab	Quelle
6	16	5	Endlagersystem	Isolation des Abfalls von ausgehender Phenomenen über Tage und menschlichem Eindringen			ANDRA, Dossier 2005 Argile
6	16	6	Endlagersystem	Daten- und Informationserhalt			ANDRA, Dossier 2005 Argile
6	16	7	Endlagersystem	Widerstand gegen Wassermilchigkeit			ANDRA, Dossier 2005 Argile
6	16	8	Endlagersystem	Begrenzung der Freisetzung von Radionukliden und Immobilisierung innerhalb des Endlagers			ANDRA, Dossier 2005 Argile
6	16	9	Endlagersystem	Verzögerung und Reduzierung der Radionuklidmigration			ANDRA, Dossier 2005 Argile
7	15	1	Geologische Umgebung	Schutz des EWG bzw. des Wirtsgestein vor geologischen Prozessen			GRS
7	15	2	Geologische Umgebung	Rückhaltung von Radionukliden	Sorption		GRS
7	15	3	Geologische Umgebung	Reduktion der Radionuklidkonzentration durch Verdünnung und radioaktiven Zerfall			GRS
8	7	1	Geotechnische Barrieren	Ungestörter Übergang vom Wirtsgestein auf das Abdichtbauwerk			GRS
8	7	2	Geotechnische Barrieren	Dichter Abschluss der Randzone zum Wirtsgestein			GRS
8	7	3	Geotechnische Barrieren	Ausbildung vergleichbarer Eigenschaften zum Wirtsgestein			GRS
8	7	4	Geotechnische Barrieren	Ausreichende Standfestigkeit gegen einwirkende Lasten			GRS
8	7	5	Geotechnische Barrieren	Ableitung der Zerfallswärme	Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ [J/(m s K)])		GRS
8	7	6	Geotechnische Barrieren	Vermeidung einer EDZ insbes. im Bereich von Abdichtungsbauwerken (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
8	7	7	Geotechnische Barrieren	Evtl. Erzeugung hydraulischer Kurzschlüsse zur Minimierung hydr. Gradienten (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
8	7	8	Geotechnische Barrieren	Vermeidung mechanischer Störungen der Abfallgebinde durch Konvergenz des Wirtsgesteins (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
8	7	9	Geotechnische Barrieren	Vermeidung mechanischer Störungen des konvergierenden Wirtsgesteins durch EBS-Komponenten (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
8	7	10	Geotechnische Barrieren	keine oder nur geringe Durchlässigkeit gegenüber Fluiden	Fluiddruck	$P_F < P_L$	GRS
8	7	11	Geotechnische Barrieren	keine oder nur geringe Durchlässigkeit gegenüber Fluiden	Verschlusspermeabilität	$k_D < 10^{-17} \text{ m}^2$	GRS
9	6	1	Puffermaterial	Ausrichtung auf diffusionsbegrenztem Stofftransport			Posiva
9	6	2	Puffermaterial	Isolierung der Behälter und Schutz gegen geringen Gesteinsbewegungen			Posiva

Anhang 4: SF-Datengrundlage

Kenn_Nr	SK_Nr	SK_LFD_Nr	Systemkomponente	Sicherheitsfunktion	Beurteilungsgröße	Bewertungsmaßstab	Quelle
9	6	3	Puffermaterial	Fixierung der Behälterposition im Bohrloch			Posiva
9	6	4	Puffermaterial	Abführung der Wärme von den Behältern in das Gestein			Posiva
9	6	5	Puffermaterial	Ausreichende Permeabilität gegenüber Gasen			Posiva
9	6	6	Puffermaterial	Filterwirkung gegenüber gebildeten Kolloiden in den Behältern			Posiva
9	6	7	Puffermaterial	Erhaltung der chemischen und mechanischen Eigenschaften			Posiva
9	6	8	Puffermaterial	Keine schädlichen Auswirkungen auf andere Barrieren			Posiva
9	6	9	Puffermaterial	Begrenzung des advektiven Transportes	Hydraulische Leitfähigkeit (HL) und Schwelldruck (SP)	HL < 10 <sup>-12</sup> m/s, SP > 1 MPa	SKB
9	6	10	Puffermaterial	Filterwirkung gegenüber Kolloiden	Dichte des Puffermaterials (DP)	DP > 1650 kg/m <sup>3</sup>	SKB
9	6	11	Puffermaterial	Unterbindung (Beseitigung) von Mikroben	Schwelldruck (SP)	SP > 2 Mpa	SKB
9	6	12	Puffermaterial	Ausreichender Scherwiderstand gegenüber dem umgebenden Gestein	Dichte des Puffermaterials (DP)	DP < 2050 kg/m <sup>3</sup>	SKB
9	6	13	Puffermaterial	Stabiles Verhalten gegenüber Temperatureinwirkung	Temperatur (TP)	TP < 100 °C	SKB
9	6	14	Puffermaterial	Verhinderung eines Absinkens des Behälters	Schwelldruck (SP)	SP > 0,2 Mpa	SKB
9	6	15	Puffermaterial	Begrenzung des Druckes auf Behälter und Gestein	Temperatur (TP)	TP > -5 °C	SKB
10	10	1	Schachtverschluss	Isolation der Abfälle im Verbund mit den Verschlüssen der Einlagerungsbereiche			GRS
11	17	1	Standort	Geringes hydraulisches Gefälle			BGR
12	6	1	Versatz (Strecken)	Verhinderung der Ausbildung von signifikanten Transportwegen in den Strecken und der Auflockerungszonen			Posiva
12	6	2	Versatz (Strecken)	Fixierung der Position des Puffermaterials und der Behälter im Bohrloch			Posiva
12	6	3	Versatz (Strecken)	Stabilisierung der Standfestigkeit der Strecken			Posiva
12	6	4	Versatz (Strecken)	Erhaltung der chemischen und mechanischen Eigenschaften			Posiva
12	6	5	Versatz (Strecken)	Keine schädlichen Auswirkungen auf andere Barrieren			Posiva
12	6	6	Versatz (Strecken)	Begrenzung des advektiven Transportes	Hydraulische Leitfähigkeit (VL), Schwelldruck (VP) und Temperatur (VT)	VL < 10 <sup>-10</sup> m/s, VP > 0,1 MPa, VT > 0 °C	SKB
12	6	7	Versatz (Strecken)	Schutz der Abfallbinde vor geomechanischen und geochemischen Einwirkungen			GRS
12	6	8	Versatz (Strecken)	Begrenzung der Auflockerungszone			GRS
12	6	9	Versatz (Strecken)	Gute selbstabdichtende Eigenschaften nach physikalischen Störungen	Plastizität		GRS

Anhang 4: SF-Datengrundlage

Kenn_Nr	SK_Nr	SK_LFD_Nr	Systemkomponente	Sicherheitsfunktion	Beurteilungsgröße	Bewertungsmaßstab	Quelle
12	6	10	Versatz (Strecken)	Verhinderung einer raschen Aufsättigung mit Wasser			GRS
12	6	11	Versatz (Strecken)	Verzögerung eines Radionuklidtransportes	Permeabilität, Porosität		GRS
12	6	12	Versatz (Strecken)	Rückhaltung von Radionukliden	Sorption		GRS
12	6	13	Versatz (Strecken)	Niedrige Radionuklidlöslichkeit im Porenwasser	Löslichkeit		GRS
12	6	14	Versatz (Strecken)	Ableitung der Zerfallswärme	Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ [J/(m s K)])		GRS
12	6	15	Versatz (Strecken)	Gewährleistung eines geringen Durchlässigkeitsvermögen gegenüber Flüssigkeiten	Porosität	$n_v < 0,01 n_0$	GRS
12	6	16	Versatz (Strecken)	Ausprägung einer hohen Stützwirkung	Resthohlraum, Widerstand gegen Lasten	Porosität, isostatische Last	GRS
13	14	1	Wirtsgestein	Geringe Neigung zur Ausbildung von (sekundären) Wegsamkeiten	Duktilität (Verformbarkeit, Bruchfestigkeit)	Beanspruchungen $<$ Dilatanzgrenze	GRS
13	14	2	Wirtsgestein	Geringe Durchlässigkeit gegenüber Fluiden	Permeabilität	$P < 10^{-17} \text{ m}^2$ (technisch dicht und $10^{-20} \text{ m}^2$ geolog. Dicht)	GRS
13	14	3	Wirtsgestein	Gute Verheilungseigenschaften bei Riß- oder Kluffbildung	Viskoplastisches Deformationsverhalten	Indikator "Reduzierung der Sekundärpermeabilität"	GRS
13	14	4	Wirtsgestein	Hohe Standfestigkeit gegenüber endogenen und exogenen Einflüssen			GRS
13	14	5	Wirtsgestein	Hoher Homogenisierungsgrad des Gesteins, das frei von vernetzten Riss- bzw. Kluffsystemen ist			GRS
13	14	6	Wirtsgestein	Hohes Sorptionsvermögen gegenüber Radionukliden			GRS
13	14	7	Wirtsgestein	Stabiles geochemisches Milieu	pH	$7 < \text{pH} < 9$	GRS
13	14	8	Wirtsgestein	Gute Wärmeleitfähigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit			GRS
13	14	9	Wirtsgestein	Isolation des Endlagers von der Biosphäre			Posiva
13	14	10	Wirtsgestein	Schutz gegen oberflächen und oberflächennahen Prozessen			Posiva
13	14	11	Wirtsgestein	Bereitstellung günstiger und vorhersagbarer mechanischer, geochemischer und geohydrologischer Gegebenheiten			Posiva
13	14	12	Wirtsgestein	Begrenzung und Rückhaltung des Zuflusses und der Freisetzung von gesundheitsschädlichen Substanzen, zu und aus dem Endlager			Posiva

Anhang 4: SF-Datengrundlage

Kenn_Nr	SK_Nr	SK_LFD_Nr	Systemkomponente	Sicherheitsfunktion	Beurteilungsgröße	Bewertungsmaßstab	Quelle
13	14	13	Wirtsgestein	Bereitstellung günstiger chemischer Bedingungen	Reduzierende Bedingungen Salinität Ionische Spannung Konzentrationen pH Vermeidung von Korrosion durch Chlor	Begrenzung des Eh Begrenzte TDS [M <sup>2+</sup> ] > 1 mM begrenzte Konzentrationen an K, HS <sup>-</sup> , Fe pH < 11 pH > 4 oder [Cl <sup>-</sup> ] < 3M	SKB
13	14	14	Wirtsgestein	Bereitstellung von günstigen hydrologischen und transportspezifischen Bedingungen	Transportwiderstand Bruch- bzw. Rissdurchlässigkeit Hydraulische Gradienten Kd, De Kolloidkonzentration	Transportwiderstand begrenzte Durchlässigkeiten begrenzte hydraulische Gradienten hohe Kd und De Werte geringe Kolloidkonzentration	SKB
13	14	15	Wirtsgestein	Bereitstellung von stabilen mechanischen Bedingungen	Scherbewegungen im Bereich der Einlagerungsbohrungen Grundwasserdruck	Scherbewegungen < 0,1 m begrenzter Grundwasserdruck	SKB
13	14	16	Wirtsgestein	Bereitstellung von thermisch günstigen Bedingungen	Temperatur (TW)	TW > Gefrierpunkt des Puffermaterials	SKB
13	14	17	Wirtsgestein	Aufsättigung quellender Abdichtungsbauwerke (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
13	14	18	Wirtsgestein	evtl. Begrenzung des Wasserangebots zur Offenhaltung von Gasspeicherräumen (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
13	14	19	Wirtsgestein	Lenkung porendruck-induzierter Risse in Schichttrichtung (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
14	14+6	1	Wirtsgestein + Bentonit	Selbstabdichtung (self-sealing) nach hydro-mechanischen Störungen (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	1	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Verminderung der RN-Freisetzung aus der Abfallmatrix			GRS
15	14+7	2	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Vermeidung kritischer Temperaturen durch Wärmetransport (Bezug zu Nr. 1 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	3	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Erhaltung eines die Freisetzung hemmenden chemischen Milieus (z.B. Redox-/Säurepufferung) (Bezug zu Nr. 1 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	4	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Begrenzung des Wasserangebots für die Metallkorrosion (Bezug zu Nr. 1 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS

Anhang 4: SF-Datengrundlage

Kenn_Nr	SK_Nr	SK_LFD_Nr	Systemkomponente	Sicherheitsfunktion	Beurteilungsgröße	Bewertungsmaßstab	Quelle
15	14+7	5	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Isolation: Verlangsamung des RN-Transports & Dämpfung der Konzentrationssignale			GRS
15	14+7	6	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Behinderung der Fluid-Advektion (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	7	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Behinderung der Diffusion (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	8	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	RN-Sorption im weitesten Sinne (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	9	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Erhaltung oder Einstellung eines Transport-hemmenden geochemischen Milieus (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	10	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Kolloid- und Mikrofiltration (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	11	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	evtl. Speicherung und Dispersion radioaktiver Gase (Bezug zu Nr. 5 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	12	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Vermeidung und Reversion von Störungen der Sicherheitsfunktion „Isolation“			GRS
15	14+7	13	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Vermeidung kritischer Gasdrücke (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	14	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Begrenzung des Wasserangebots für die Metallkorrosion (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	15	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Gasableitung, die in Bezug auf RN-Austrag und neue Wegsamkeiten unkritisch ist (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	16	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Vermeidung kritischer Temperaturen durch Wärmetransport (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS
15	14+7	17	Wirtsgestein + geotechnische Barrieren	Vermeidung ungünstiger hydrochemischer Milieus (Bezug zu Nr. 12 Wirtsgestein + geotechnische Barrieren)			GRS

Anhang 5: Festgelegte Sicherheitsfunktionen

SF_Nr	SF_GR	SF_NAME	SF_ART	SK	SF_ANALOG	SF_ZUS_Nr
16	GS	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des kontumahren Wirtsgesteins	S	VE	16, 23, 29, 38	1
23	GS	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des kontumahren Wirtsgesteins	S	BE	16, 23, 29, 38	1
29	GS	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des kontumahren Wirtsgesteins	S	WB	16, 23, 29, 38	1
38	GS	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des kontumahren Wirtsgesteins	S	SV	16, 23, 29, 38	1
15	GS	Geomechanische Stabilisierung: Lagefixierung des Abfallgebändes	S	VE		2
40	GS	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme (Gas- und Fluidrücke)	S	SV	24, 40, 45	3
24	GS	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme (Gas- und Fluidrücke, sowie des Bentonitquelldrucks des Versatzes (Tonsteinkonzept))	S	BE	24, 40, 45	3
45	GS	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme Gas- und Fluidrücke bzw. des Bentonitquelldrucks (Tonstein)	S	EWG	24, 40, 45	3
46	GS	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	S	EWG	46, 55, 61	4
55	GS	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen (z. B. Eisauflast)	S	WG	46, 55, 61	4
61	GS	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen (z. B. Eisauflast)	S	GU	46, 55, 61	4
47	GS	Geomechanische Stabilisierung: Mechanischer Schutz der technischen Abdichtungen	S	EWG		5
30	GS	Geomechanische Stabilisierung: Schutz der Hangenden Schichten vor der Bildung von sekundären Wegsamkeiten	S	WB		6
14	GS	Geomechanische Stabilisierung: Schutz des Abfallgebändes vor geomechanischen Einflüssen von Außen	S	VE	7, 14	7
7	GS	Geomechanische Stabilisierung: Schutz des Abfallprodukts vor geomechanischen Einflüssen von Außen	S	AB	7, 14	7
54	IE	<b>Integritätsbehalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion</b>	S	WG	54, 60	8
60	IE	<b>Integritätsbehalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion</b>	S	GU	54, 60	8
19	LZ	Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zu den Abfallbehältern	R	VE	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
56	LZ	Begrenzung/Verhinderung eines Lösungszutritts in den bzw. eines Lösungsaustritts aus dem ewG durch geringe Permeabilität	R	WG	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
41	LZ	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts in das bzw. Begrenzung des Lösungsaustritts aus dem Endlagerbergwerk	R	SV	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
49	LZ	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts in das bzw. Lösungsaustritts aus dem Endlagerbergwerk durch geringe Permeabilität	R	EWG	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
50	LZ	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts in das bzw. Lösungsaustritts aus dem Endlagerbergwerk durch Verheilung der Auflockerungszonen	R	EWG	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
31	LZ	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts zu den Einlagerungsbereichen	R	BE	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
31	LZ	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts zu den Einlagerungsbereichen	R	WB	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
11	LZ	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts zum Abfallprodukt ( <b>modifiziert</b> )	R	AB	11, 19, 31, 41, 49, 50, 56	9
22	RG	<b>Rückhaltung gasförmiger Radionuklide</b>	R	VE	22, 34, 43, 53, 59	10
34	RG	<b>Rückhaltung gasförmiger Radionuklide</b>	R	BE	22, 34, 43, 53, 59	10
34	RG	<b>Rückhaltung gasförmiger Radionuklide</b>	R	WB	22, 34, 43, 53, 59	10
43	RG	<b>Rückhaltung gasförmiger Radionuklide</b>	R	SV	22, 34, 43, 53, 59	10
53	RG	<b>Rückhaltung gasförmiger Radionuklide</b>	R	EWG	22, 34, 43, 53, 59	10
59	RG	<b>Rückhaltung gasförmiger Radionuklide</b>	R	WG	22, 34, 43, 53, 59	10
10	SO	Begrenzung der Gasbildung: Begrenzung der Gasbildungsrate (Korrosion) und Gasmenge	S	AB		11
X1	SO	Begrenzung des Radionuklidtransports durch geringe Permeabilität	R	GU		12
X4	SO	Verdünnung von Radionuklidkonzentrationen durch Zumischung von nichtkontaminierten Grundwässern	R	GU		13
8	TI	Temperaturbegrenzung/Integritätsbehalt: Ableitung der Zerfallswärme in das Versatzmaterial	S	AB	8, 17	14
17	TI	Temperaturbegrenzung/Integritätsbehalt: Ableitung der Zerfallswärme in das Wirtsgestein	S	VE	8, 17	14
48	TI	Temperaturbegrenzung/Integritätsbehalt: Schadloose Aufnahme der Zerfallswärme	S	EWG		15
X3	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Ausbildung einer mineralisationsbedingten Dichteschichtung	R	GU		17
X5	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Kolloidfiltration	R	GU		18
20	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Löslichkeitsbegrenzung	R	VE		16
52	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption	R	EWG	21, 33, 42, 52, 58, X2	19
58	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption	R	WG	21, 33, 42, 52, 58, X2	19
X2	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption	R	GU	21, 33, 42, 52, 58, X2	19
21	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption (Bentonit)	R	VE	21, 33, 42, 52, 58, X2	19
33	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption (Bentonit)	R	BE	21, 33, 42, 52, 58, X2	19
33	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption (Bentonit)	R	WB	21, 33, 42, 52, 58, X2	19
42	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption (Bentonitabdichtung)	R	SV	21, 33, 42, 52, 58, X2	19
6	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	R	AB		19
1	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Lösungsbeständigkeit der Hüllrohre und der Brennstofftableten	R	A		20
3	VR	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Beständigkeit der Glasmatrix gegenüber zutretender Lösung (Glaskorrosion)	R	FM		21

## Anhang 6: Erwartete Entwicklung für den Endlagerstandort in Salz

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
1		Abfall	Die <b>hochradioaktiven</b> Abfälle umfassen:			
2		Abfall	· abgebrannte Brennelemente (direkte Endlagerung) sowie			
3		Abfall	· verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung			
4		Abfall	Die Brennelementtypen sind UO <sub>2</sub> - und MOX-Brennelemente sowohl aus Druck- als auch Siedewasserreaktoren sowie AVR- und THTR-Brennelementkugeln.			
5	3_4_3	Abfall	Die Radionuklide als der einzulagernde Abfall im engeren Sinne unterliegen lediglich dem radioaktiven Zerfall.	Der radioaktive Zerfall verringert die Radionuklidkonzentration.	Der radioaktive Zerfall verringert die Radionuklidkonzentration weiter.	Der radioaktive Zerfall verringert die Radionuklidkonzentration weiter.
6	3_4_1	Abfall	Der radioaktive Zerfall geht mit einer Wärmeproduktion einher und führt zur Aufheizung der Umgebung.	Die Wärmeproduktion und die Aufheizung der Umgebung ist abgeklungen.		
7	1_8_1	Abfall	Der Einstellung der chemischen Gleichgewichtsreaktionen an Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) wird von physikalisch-chemischen Eigenschaften (pH, Lösungs-	Der erwartete Einstellung der chemischen Gleichgewichtsreaktionen an Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) wird von physikalisch-chemischen	Der erwartete Einstellung der chemischen Gleichgewichtsreaktionen an Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) wird von	Der erwartete Einstellung der chemischen Gleichgewichtsreaktionen an Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) wird von

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			zusammensetzung, Temperatur,...) bestimmt und ist ohne den Zutritt von Lösungen / Feuchtigkeit vergleichsweise langsam. Die Mobilisierung der Radionuklide ist gering. Der Radionuklidtransport wird vorzugsweise diffusiv stattfinden.	Eigenschaften (pH, Lösungszusammensetzung, Temperatur,...) bestimmt und ist ohne den Zutritt von Lösungen / Feuchtigkeit vergleichsweise langsam. Die Mobilisierung der Radionuklide ist gering. Der Radionuklidtransport wird vorzugsweise diffusiv stattfinden.	physikalisch-chemischen Eigenschaften (pH, Lösungszusammensetzung, Temperatur,...) bestimmt und ist ohne den Zutritt von Lösungen / Feuchtigkeit vergleichsweise langsam. Die Mobilisierung der Radionuklide ist gering. Der Radionuklidtransport wird vorzugsweise diffusiv stattfinden.	physikalisch-chemischen Eigenschaften (pH, Lösungszusammensetzung, Temperatur,...) bestimmt und ist ohne den Zutritt von Lösungen / Feuchtigkeit vergleichsweise langsam. Die Mobilisierung der Radionuklide ist gering. Der Radionuklidtransport wird vorzugsweise diffusiv stattfinden.
	3_2_3	Abfall	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall und Radiolyse ist unbedeutend.	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall und Radiolyse ist unbedeutend.	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall und Radiolyse ist unbedeutend.	
8	3_2_1 3, 3_4_1, 3_4_9	Fixierungsmittel	Infolge der thermisch bereits im Reaktor induzierten Entmischungsvorgänge reichern sich einige Radionuklide, u.a. das hoch mobile <sup>129</sup> I an <b>Korngrenzen</b> und in <b>Rissen</b> innerhalb der Brennstoffmatrix (Pellets) sowie an den <b>Spalten</b> im Übergangsbereich zwischen Brennstoff und Hüllrohr und im Gasraum weiter an. Da einige Radionuklide im Fall eines Lö-	Die thermisch induzierten Entmischungsvorgänge sind abgeschlossen. Die Anreicherung einiger Radionuklide, u.a. das hoch mobile <sup>129</sup> I an <b>Korngrenzen</b> und in <b>Rissen</b> innerhalb der Brennstoffmatrix (Pellets) sowie an den <b>Spalten</b> im Übergangsbereich zwischen Brennstoff und Hüllrohr und im Gasraum bleibt bestehen.	Die Anreicherung einiger Radionuklide, u.a. das hoch mobile <sup>129</sup> I an <b>Korngrenzen</b> und in <b>Rissen</b> innerhalb der Brennstoffmatrix (Pellets) sowie an den <b>Spalten</b> im Übergangsbereich zwischen Brennstoff und Hüllrohr und im Gasraum bleibt bestehen, ist aber durch Diffusion in die Umgebung	Die Umbildungsprozesse aufgrund chemischer Ungleichgewichte im Nahfeld sind abgeschlossen.

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			sungszutritts und Undichtigkeiten besonders schnell, d.h. in der Größenordnung von Tagen bis einigen Jahren, in hohen Anteilen mobilisiert werden, werden sie der <b>Instant Release Fraction (IRF)</b> zugeordnet. Typische Spalt- und Aktivierungsprodukte, die in relativ hohen Anteile einer IRF haben, sind <sup>14</sup> C, <sup>129</sup> I, <sup>36</sup> Cl und <sup>135</sup> Cs.		verringert.	
9	3_4_x	Fixierungsmittel	Die <b>Brennstoffmatrix</b> aus UO <sub>2</sub> oder MOX selbst unterliegt ohne Lösungszutritt wesentlich langsameren Veränderungsprozessen. Neben den temperaturbedingten Entmischungsvorgängen nach dem Abbrand treten auch strahlungsbedingte Veränderungen auf, die erst bei Lösungszutritt durch $\alpha$ -Radiolyse des Wassers zu nennenswerten Radiolyseprodukten führen können. Eine Matrixkorrosion findet bei Anwesenheit oxidierender Spezies statt, die 4-wertiges Uran der UO <sub>2</sub> -Matrix zur 6-wertigen Form	Die <b>Brennstoffmatrix</b> aus UO <sub>2</sub> oder MOX selbst unterliegt weiterhin langsamen Veränderungsprozessen. Die temperaturbedingten Entmischungsvorgänge sind abgeschlossen und es treten lediglich noch strahlungsbedingte Veränderungen der Brennstoffmatrix auf. Erst bei Lösungszutritt können durch $\alpha$ -Radiolyse des Wassers nennenswerte Radiolysegasmengen entstehen und eine Matrixkorrosion bei Anwesenheit oxidierender Spezies stattfinden, die 4-wertiges Uran	Die <b>Brennstoffmatrix</b> aus UO <sub>2</sub> oder MOX selbst unterliegt weiterhin langsamen Veränderungsprozessen. Es treten lediglich noch strahlungsbedingte Veränderungen der Brennstoffmatrix auf. Erst bei Lösungszutritt können durch $\alpha$ -Radiolyse des Wassers nennenswerte Radiolysegasmengen entstehen und eine Matrixkorrosion bei Anwesenheit oxidierender Spezies stattfinden, die 4-wertiges Uran der UO <sub>2</sub> -Matrix zur 6-	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			oxidieren kann.	der UO <sub>2</sub> -Matrix zur 6-wertigen Form oxidiert.	wertigen Form oxidiert.	
10	3_4_2	Fixierungsmittel	Die UO <sub>2</sub> -Matrix kann Oxidantien bis zu einem gewissen Maß aufnehmen ohne instabil zu werden. Erst ab einer Schwellenkonzentration beginnt ein oxidativer Auflösungsprozess. Das Redox-Milieu im Kontaktbereich zwischen Lösung und Brennstoffabfällen bestimmt die Geschwindigkeit einer Brennstoffauflösung und auch die Löslichkeit der Radionuklide im Falle eines Lösungszutritts. Die Einstellung von reduzierenden Bedingungen durch die Behälterkorrosion verringert die Auflösungsrate der Brennstoffmatrix deutlich gegenüber oxidierenden Bedingungen.			
11	1_8_1	Fixierungsmittel	Ein Teil der aus dem primären Brennstoffgefüge mobilisierten Radionuklide wird an neugebildeten Sekundärphasen (feste Umwandlungsprodukte des Brennstoffs) erneut immobilisiert. Die Radionuk-	Ein Teil der aus dem primären Brennstoffgefüge mobilisierbaren Radionuklide wird an neugebildeten Sekundärphasen (feste Umwandlungsprodukte des Brennstoffs) erneut	Die internen Umbildungsprozesse sind abgeschlossen bzw. im Gleichgewicht.	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			lidmobilisierung ist inkongruent, d.h. das Spektrum der mobilisierbaren Radionuklide entspricht nicht der durchschnittlichen Radionuklidzusammensetzung des Brennstoffs. Die internen Umbildungsprozesse (auch nach einem Lösungszutritt) sind <b>nach 10000</b> Jahren noch nicht abgeschlossen sind.	immobilisiert. Die Radionuklidmobilisierung ist inkongruent, d.h. das Spektrum der mobilisierbaren Radionuklide entspricht nicht der durchschnittlichen Radionuklidzusammensetzung des Brennstoffs. Für die Umbildungsprozesse <b>werden Zeiträume über 10000</b> Jahren zugrunde gelegt.		
12	3_4_4, 1_6_2	Fixierungsmittel	Die Gasbildung durch den radioaktiven Zerfall oder Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Brennstoffmatrix gering. Der Gasabfluss erfolgt diffusiv.			
13	2_1_1 1	Fixierungsmittel	Das Fixierungsmittel bei HAW-(Glas-)Kokillen ist Borosilikat. Borosilikatglas besitzt einen Anteil von etwa 10 % Borooxid und wird wegen der hohen Temperaturbeständigkeit und des geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten verwendet. Die Radionuklide der Prozesslösungen der Wiederaufarbeitung sind in die molekulare Struktur des Glases ein-			

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			gebunden. Koordinationspolyeder, Bindungsabstände und Bindungsenergien der in die Glasmatrix eingebauten Radionuklide sind ähnlich der von Kristallen, so dass die meisten Radionuklide homogen verteilt in fester Lösung (solid solution) in der Glasphase vorliegen.			
14	3_4_7, 3_1_3	Fixierungsmittel	Die Temperaturveränderungen und der radioaktiver Zerfall beeinträchtigen die Glasstruktur durch Bildung von Rissen und amorphen Bereichen.	Der radioaktive Zerfall beeinträchtigt weiterhin die Glasstruktur durch Bildung von Rissen und amorphen Bereichen.	Der radioaktive Zerfall beeinträchtigt weiterhin die Glasstruktur durch Bildung von Rissen und amorphen Bereichen.	
15	1_8_1	Fixierungsmittel	Verglaste Abfälle können unter Umwandlung der originalen Glasstruktur sowohl amorphe als auch kristalline <b>Sekundärphasen</b> bilden. Aufgrund des komplexen, stark kinetisch kontrollierten Ablaufs der Glasumwandlung beruht eine erwartete Entwicklung bei Lösungszutritt auf stark vereinfachten und möglicherweise überkonservativen Annahmen. Ohne Lösungszutritt findet lediglich eine	Die verglasten Abfälle haben unter Umwandlung der originalen Glasstruktur <b>Sekundärphasen</b> gebildet. Aufgrund des komplexen, stark kinetisch kontrollierten Ablaufs der Glasumwandlung beruht eine erwartete Entwicklung bei Lösungszutritt auf stark vereinfachten und möglicherweise überkonservativen Annahmen. Ohne Lösungszutritt findet lediglich eine langsame Umwand-	Die verglasten Abfälle haben unter Umwandlung der originalen Glasstruktur <b>Sekundärphasen</b> gebildet. Aufgrund des komplexen, stark kinetisch kontrollierten Ablaufs der Glasumwandlung beruht eine erwartete Entwicklung bei Lösungszutritt auf stark vereinfachten und möglicherweise überkonservativen Annahmen. Ohne Lösungszu-	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			langsame Umwandlung der Glasmatrix statt, die auch durch den Energieeintrag aufgrund des Zerfalls der Radionuklide beeinflusst wird (Metamiktisierung). Die Mobilität der Radionuklide innerhalb der Glasmatrix wird durch Diffusionsprozesse auf Grenzflächen innerhalb von Rissen dominiert. Heterogene Bereiche bilden sich durch Rekristallisation und Entmischung aus.	lung der Glasmatrix bzw. Rekristallisation der amorphen Bereiche statt, die durch den Energieeintrag aufgrund des Zerfalls der Radionuklide beeinflusst wird (Metamiktisierung). Die Mobilität der Radionuklide innerhalb der Glasmatrix wird durch Diffusionsprozesse auf Grenzflächen innerhalb von Rissen dominiert. Heterogene Bereiche bilden sich durch Rekristallisation und Entmischung aus.	tritt findet lediglich eine langsame Umwandlung der Glasmatrix bzw. Rekristallisation der amorphen Bereiche statt, die durch den Energieeintrag aufgrund des Zerfalls der Radionuklide beeinflusst wird (Metamiktisierung). Die Mobilität der Radionuklide innerhalb der Glasmatrix wird durch Diffusionsprozesse auf Grenzflächen innerhalb von Rissen dominiert. Heterogene Bereiche bilden sich durch Rekristallisation und Entmischung aus.	
16	3_2_3	Fixierungsmittel	Die Gasbildung aus Zerfallprodukten und Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Glasmatrix gering. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	Die Gasbildung aus Zerfallprodukten und Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Glasmatrix gering. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	Die Gasbildung aus Zerfallprodukten und Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Glasmatrix gering. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	
17	3_2_6	Fixierungsmittel	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils und der fehlenden Lösung nicht vorhanden.	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils und der fehlenden Lösung nicht vorhanden.	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils und der fehlenden Lösung nicht vorhanden.	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
18	3_3_4	Fixierungsmittel	Das Auflaufen des Gebirgsdrucks auf die Kokillen führt zur Rissbildung im Glas.	Die Rissbildung durch den auflaufenden Gebirgsdruck ist weitgehend abgeschlossen.		
19	3_2_1 4	Fixierungsmittel	Wechselwirkungen zwischen den Abfallkategorien finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den Abfallkategorien finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den Abfallkategorien finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	
20	2_1_1, 2_1_2, 2_1_3	Abfallbehälter	Die Kokillenbehälter aus Stahl werden durch mechanische Einwirkungen des Gebirgsdrucks ausfallen oder werden durch Lochkorrosion nach einiger Zeit ihre Barrierenwirkung verlieren. Die Zeitdauer einer Lochkorrosion ist unter trockenen Verhältnissen vergleichsweise lang gegenüber Bedingungen, die sich bei einem Lösungszutritt einstellen. Einzelne Kokillen werden im Einlagerungsbohrloch nicht in der vorgesehenen Position liegen bzw. weisen Behälter- oder Materialdefekte auf.	Die Kokillenbehälter aus Stahl haben ihre Barrierenwirkung durch mechanische Einwirkungen größtenteils verloren. Die Korrosion bzw. Lochkorrosion ist unter trockenen Verhältnissen nicht abgeschlossen. Unter Bedingungen eines Lösungszutritts liegen Korrosionsprodukte und Gase vor. Die Korrosionsprodukte tragen zur Rückhaltung von Radionukliden bei.	Die Kokillenbehälter aus Stahl haben ihre Barrierenwirkung durch mechanische Einwirkungen größtenteils verloren. Die Korrosion bzw. Lochkorrosion ist unter trockenen Verhältnissen weitgehend abgeschlossen. Es liegen Korrosionsprodukte und Gase vor. Die Korrosionsprodukte tragen zur Rückhaltung von Radionukliden bei.	Die Kokillenbehälter aus Stahl haben ihre Barrierenwirkung durch mechanische Einwirkungen vollständig verloren. Die Korrosion bzw. Lochkorrosion ist unter trockenen Verhältnissen abgeschlossen. Lediglich Diffusionsprozesse bestimmen den Transport von Radionukliden.
21	1_7_2, 3_2_5, 1_7_5,	Abfallbehälter	Die Einstellung chemischer Gleichgewichte mit dem Behälter aus Stahl, ein Radio-			

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
	1_7_7		nuklidtransport, Auflösung und Ausfällung bzw. Sorption und Desorption von Radionukliden an Korrosionsprodukten findet wegen der fehlenden Lösung nicht statt bzw. ist aufgrund der geringen Restfeuchte extrem langsam.			
22	3_2_1_0	Abfallbehälter	Eine Barrierenwirkung gegenüber Gasen wird den Kokillenbehältern nicht unterstellt.			
23	3_2_6	Abfallbehälter	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils und der fehlenden Lösung nicht vorhanden.			
24	2_1_1, 2_1_2, 2_1_3, 3_2_5	Abfallbehälter	Die POLLUX-Behälter sind aus dickwandigem Stahl und so ausgelegt, dass sie einem Gebirgsdruck standhalten. Aufgrund von denkbaren anfänglichen Defekten sind lediglich vereinzelte Behälter undicht. Daher wird die Lebensdauer erst ab dem Zeitpunkt eines Laugenzutritts deutlich beeinflusst und ist von der Korrosionsrate der Behälter abhängig. Erwartet	Die POLLUX-Behälter sind aus dickwandigem Stahl und so ausgelegt, dass sie einem Gebirgsdruck standhalten. Die gebirgsmechanische Einwirkungen führen daher nicht zu einem Ausfall. Aufgrund von denkbaren anfänglichen Defekten sind lediglich vereinzelte Behälter undicht. Die Lebensdauer wird erst ab dem Zeitpunkt	Die POLLUX-Behälter sind aus dickwandigem Stahl und so ausgelegt, dass sie einem Gebirgsdruck standhalten. Mechanische Einwirkungen führen daher nicht zu einem Ausfall. Aufgrund von denkbaren anfänglichen Defekten sind vereinzelte Behälter undicht. Die Lebensdauer wird erst ab dem Zeit-	Es besteht für diesen Zeitraum keine Erwartung mehr an die Dichtigkeit der Behälter. Die Bildung größerer Mengen an Korrosionsprodukten aufgrund der salzstockinternen Feuchtigkeit ist erfolgt. Die Korrosionsprodukte tragen ihrerseits zur Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			<p>werden aufgrund von Laboruntersuchungen Korrosionsraten für den TStE3555-Stahl für NaCl-Lösung und MgCl<sub>2</sub>-Lösung von 5 µm/a bzw. 70 µm/a bei 90°C. Die Korrosionsrate nimmt dabei mit der Temperatur stark zu (46 µm/a bzw. 224 µm/a bei 170°C /SMA 99/). Die Korrosionsrate ist auch von der Lösungszusammensetzung abhängig.</p>	<p>eines Laugenzutritts durch Korrosion deutlich beeinflusst und ist von der Korrosionsrate der Behälter abhängig. Da in diesem Zeitraum keine erhöhte Temperatur vorliegt, sind Undichtigkeiten von Behältern durch Korrosion erst gegen Ende des Zeitraums in Verbindung mit mechanischen Einwirkungen zu erwarten. Die Korrosionsprodukte tragen ihrerseits zur Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption und Einstellung niedriger Löslichkeiten bei.</p>	<p>punkt eines Laugenzutritts durch Korrosion deutlich beeinflusst und ist von der Korrosionsrate der Behälter abhängig. Da in diesem Zeitraum keine erhöhte Temperatur vorliegt, ist eine Undichtigkeit von weiteren Behältern durch Korrosion innerhalb des Zeitraums in Verbindung mit mechanischen Einwirkungen zu erwarten. Die Korrosionsprodukte tragen ihrerseits zur Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption und Einstellung niedriger Löslichkeiten bei.</p>	<p>und Einstellung niedriger Löslichkeiten bei.</p>
25	2_1_1, 2_1_2, 2_1_3, 3_2_5	Abfallbehälter	<p>Ohne Lösungszutritt, d.h. nur mit der natürlichen Feuchte des Salzgrusversatzes, werden sehr geringe Korrosionsraten erwartet, die rechnerisch auf lange Standzeiten über 100 000 Jahre führen. Ein früherer Ausfall weniger Behälter wird durch andere Ereignisse, z.B. durch Riss-</p>	<p>Ohne Lösungszutritt, d.h. nur mit der natürlichen Feuchte des Salzgrusversatzes, bleiben die Korrosionsraten gering und führen auf lange Standzeiten über 100 000 Jahre Ein früherer Ausfall weiterer Behälter wird durch andere Ereignisse, z.B. durch</p>		

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			bildung durch Alterung, fehlerhafte Dichtungen oder mangelhafte Qualität einzelner Behälter erwartet.	Rissbildung aufgrund Alterung, fehlerhafter Dichtungen oder mangelhafter Qualität einzelner Behälter erwartet.		
26	3_4_1	Abfallbehälter	Über den Behälter wird die Zerfallswärme in den Versatz und das umgebende Gestein abgeleitet.			
27	3_2_1 4	Abfallbehälter	Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallbehältern finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallbehältern finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallbehältern finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	
28	3_3_4	Abfallbehälter	Veränderungen der Abfallbehälter finden aufgrund des radioaktiven Zerfalls und der Temperaturentwicklung statt.			
29	1_7_6	Abfallbehälter	Aufgrund der fehlenden Lösung findet lediglich eine Festkörperdiffusion von Radionukliden statt, die auf das nähere Umfeld der Abfallbehälter beschränkt ist.	Aufgrund der fehlenden Lösung findet lediglich eine Festkörperdiffusion von Radionukliden statt, die auf das nähere Umfeld der Abfallbehälter beschränkt ist.	Aufgrund der fehlenden Lösung findet lediglich eine Festkörperdiffusion von Radionukliden statt, die auf den Einlagerungsbereich beschränkt ist.	Aufgrund der fehlenden Lösung findet lediglich eine Festkörperdiffusion von Radionukliden statt, die auf das Endlager beschränkt ist.
30		Versatz	Die im Grubengebäude geschaffenen Hohlräume werden bei der Schließung des Endlagers, bzw. einzelner			

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			Einlagerungsfelder mit Salzgrus als <b>Versatz</b> zur Einbettung der Behälter, Stützung der Grube, Verhinderung und Verzögerung von denkbaren Lösungsflüssen, Pufferung eines chemischen Milieus und Minimierung von Hohlräumen verfüllt. Für die Einlagerungsstrecken für Polluxbehälter ist dabei ein Schleuder- und bei den sonstigen Strecken ein Blas- oder Schüttversatz mit Salzgrus vorgesehen. Der Salzgrusversatz weist einen anfänglichen Porenanteil von 35 % auf.			
31	3_4_7, 2_1_7, 2_1_1 0, 2_2_2	Versatz	Die Auflockerung der Randzonen des Gebirges um die versetzten Hohlräume schreitet fort, bis die Konvergenz des Gebirges auf den Versatz aufläuft und diesen kompaktiert. Die erhöhte Temperatur durch Einlagerung der Abfälle beschleunigt die Konvergenz.	Der Versatz ist kompaktiert und die Porosität deutlich geringer geworden. Eine Stützwirkung ist erreicht. Die Konvergenz ist weitgehend abgeklungen. Der Versatz hat die gebirgsmechanischen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erreicht.	Der Versatz erfährt keine weiteren Veränderungen.	Der Versatz erfährt keine weiteren Veränderungen.
32	2_3_8, 2_1_1	Versatz	Die Kompaktion des Versatzes durch das Auflaufen des	Die Auflockerung der Randzonen ist durch das		

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
	0		Gebirges auf den Versatz führt zu einem Stützdruck. Gleichzeitig verringern sich die Porosität und die Durchlässigkeit für Lösungen im Versatz und der Auflockungszone. Diese Entwicklung verläuft anfänglich inhomogen. Mit dem Auflaufen des Gebirges auf den Versatz verheilen die aufgelockerten Randzonen.	Auflaufen des Gebirges auf den Versatz zurückgebildet.		
33	1_6_2, 1_7_x	Versatz	Radionuklide diffundieren aus den Kokillen in den Versatz. Die chemischen Reaktionen im Versatz, Auflösung und Ausfällung von Radionukliden, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption sind aufgrund der fehlenden Lösungen ohne quantitative Bedeutung. Die physikalisch-chemischen Bedingungen (Temperatur) und Eigenschaften (Mineralzusammensetzung) wirken sich auf Kompaktion und Abnahme der Porosität und Durchlässigkeit günstig aus.	Die chemischen Reaktionen im Versatz, Auflösung und Ausfällung von Radionukliden, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption sind aufgrund der fehlenden Lösungen ohne nennenswerte Bedeutung. Die Diffusion von Radionukliden ist auf den Nahbereich der Abfallbehälter begrenzt.	Die chemischen Reaktionen im Versatz, Auflösung und Ausfällung von Radionukliden, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption sind aufgrund der fehlenden Lösungen ohne nennenswerte Bedeutung. Die Diffusion von Radionukliden ist auf den Nahbereich der Abfallbehälter begrenzt.	Die Diffusion von Radionukliden ist auf das Endlager begrenzt.
34	1_8_3, 3_2_1	Versatz	Ein Gasdruckaufbau im Versatz findet nicht statt, da	Ein Gasdruckaufbau im Versatz findet nicht statt,	Ein Gasdruckaufbau im Versatz findet nicht statt,	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
	0		durch Diffusion eine Ableitung erfolgt. Mikrobielle Gasbildungsprozesse sind wegen der fehlenden bzw. zu geringen Feuchtigkeit und fehlendem organischen Material (Kokillen) bzw. geringen organischen Material (Pollux) nicht vorhanden.	da durch Diffusion eine Ableitung erfolgt. Mikrobielle Gasbildungsprozesse sind nicht vorhanden.	da durch Diffusion eine Ableitung erfolgt. Mikrobielle Gasbildungsprozesse sind nicht vorhanden.	
35	1_7_2 - 1_7_9	Versatz	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen hinsichtlich Löslichkeit, Sorption und Transport von Radionukliden und Eigenschaften des Versatz verstärken sich für den Fall denkbarer Lösungsflüsse.	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen hinsichtlich Löslichkeit, Sorption und Transport von Radionukliden und Eigenschaften des Versatz verstärken sich für den Fall denkbarer Lösungsflüsse.	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen hinsichtlich Löslichkeit, Sorption und Transport von Radionukliden und Eigenschaften des Versatz verstärken sich für den Fall denkbarer Lösungsflüsse.	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen hinsichtlich Löslichkeit, Sorption und Transport von Radionukliden und Eigenschaften des Versatz verstärken sich für den Fall denkbarer Lösungsflüsse.
36	2_1_4, 2_1_5	Geotechnische Barrieren	Der Gebirgsdruck läuft auf die Streckenverschlüsse auf und beansprucht diese mechanisch. Zusätzlich wirken die Zerfallswärme der Abfälle und Gasdrücke auf die Streckenverschlüsse. Die vorgesehene Funktion der Streckenverschlüsse bleibt erhalten. Einige wenige Streckenverschlüsse werden ihre Funktion wegen Materialdefekten, Qualitätsmängel oder	Die mechanische Beanspruchung der Streckenverschlüsse hat zu Rissen geführt, die die Durchlässigkeit gegenüber Lösungen erhöhen. Die geomechanische Stabilisierung ist weiterhin gegeben.	Die geotechnischen Barrieren (Streckenverschlüsse) erfahren keine weiteren Veränderungen.	Die geotechnischen Barrieren (Streckenverschlüsse) erfahren keine weiteren Veränderungen.

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			Ausfall nur unvollständig erfüllen.			
37	2_1_1_0	Geotechnische Barrieren	Der Stützdruck führt zur Verheilung der aufgelockerten Randzonen des Gebirges (EDZ).	Die EDZ ist verheilt.	Die EDZ ist verheilt.	Die EDZ ist verheilt.
38	3_3_7	Weitere Barrieren	Die Verwendung von Schotter führt zu setzungstabilen und nicht kompaktierbaren Porenvolumina, die als Puffer Hohlräume für Lösungen dienen, die aus Infrastrukturbereichen zutreten. Innerhalb des Zeitraums bleibt diese Funktion mit abnehmender Qualität erhalten.	Die Puffer Hohlräume für Lösungen aus dem Infrastrukturbereich gehen verloren.	Sind nicht mehr vorhanden.	Sind nicht mehr vorhanden.
39	2_1_7, 3_3_2, 1_2_6, 1_2_1, 1_2_1_2, 1_6_1	Einschlußwirksamer Gebirgsbereich	Der Gesteinskörper dehnt sich temperaturbedingt aus. Die Konvergenz des Gebirges beeinflusst den EWG nicht. Störungen, Risse oder Klüfte bilden sich nicht aus. Die Gesteinheterogenität und Subsidenz ist unbedeutend. Das Grundwasser erreicht den EWG nicht. Änderungen des Spannungsfeldes werden vom EWG durch das visko-plastische Verhalten des Gesteins kompensiert. Fluide werden nicht advektiv	Der einschlußwirksame Gebirgsbereich bleibt in seinen Eigenschaften erhalten. Die temperaturbedingte Ausdehnung ist zurückgegangen. Fluide werden nicht advektiv transportiert.	Der einschlußwirksame Gebirgsbereich bleibt in seinen Eigenschaften erhalten. Fluide werden nicht advektiv transportiert.	Der einschlußwirksame Gebirgsbereich bleibt in seinen Eigenschaften erhalten. Fluide werden nicht advektiv transportiert.

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			transportiert.			
40	2_1_4, 2_1_5, 2_2_3,	Schachtverschluss	Der Aufbau des Schachtverschlusses aus Bentonit und Bitumen erfüllt seine Dichtwirkung. Erst nach 10000 Jahren ist durch Alterung ein Nachlassen der Dichtigkeit des Schachtverschlusses zu unterstellen. Eine fehlerhafte Erstellung des Verschlussbauwerks, die zum vollständigen Ausfall führt, wird nicht erwartet.	Der Schachtverschluss hat den vorgesehenen Wirkungszeitraum erreicht. Durch gebirgsmechanische Einwirkungen sind die Eigenschaften hinsichtlich der Durchlässigkeit gegenüber Lösungen verschlechtert.	Das Auftreten einer Eiszeit mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberföhrung führt zur Rinnenbildung, die durch nachfolgende Sedimentation wieder aufgefüllt werden. Eine Rinnenbildung mit entsprechenden Tiefgang hat einen Verlust der verbleibenden Dichtwirkung des oberen Schachtverschlusses zur Folge.	Der Schachtverschluss ist nicht mehr vorhanden
41	2_1_6	Schachtverschluss	Eine Auswirkung von Subsidenz oder geomechanischer Vorgänge auf die Wirksamkeit des Schachtverschlusses wird nicht unterstellt.			
42	1_7_4, 1_8_1	Schachtverschluss	Zusätzlich zur Dichtwirkung gegenüber Lösungen wird eine Rückhaltung von Radionukliden durch das Baumaterial bzw. Umwandlungsprodukte durch chemische Wechselwirkungen erwartet.	Eine Rückhaltung von Radionukliden am Baumaterial bzw. an Umwandlungsprodukten durch chemische Wechselwirkungen wird im Falle eines Lösungszutritts erwartet.	Eine Rückhaltung von Radionukliden durch chemische Wechselwirkungen am Baumaterial bzw. an Umwandlungsprodukten wird im Falle eines Lösungstransports erwartet.	
43	1_2_x,	Wirtsgestein	Tektonische Vorgänge wer-	Tektonische Vorgänge	Tektonische Vorgänge	Tektonische Vorgänge

Nr .	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
	1_5_x,		den für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Der Diapirismus ist unbedeutend. Die Konvergenz findet statt. Die Bildung von Störungen, Rissen oder sonstigen Diskontinuitäten im Salzstocktop ist unbedeutend. Der Grundwasserfluss bleibt im Wesentlichen unverändert.	werden für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Ein Diapirismus ist unbedeutend.	werden für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Ein Diapirismus ist unbedeutend. Das Auftreten einer Eiszeit mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberfahung hat eine Rinnenbildung zur Folge, die durch nachfolgende Sedimentation wieder aufgefüllt werden. Das Wirtsgestein wird dadurch nicht beeinträchtigt. Eine Eisbedeckung führt zu einem erhöhten litho- und hydrostatischen Druck, der eine noch andauernde Konvergenz beschleunigt.	werden für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Der Diapirismus bleibt unbedeutend. Das mehrfache Auftreten von Eiszeiten mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberfahrungen bildet weitere Rinnen im Umfeld des Endlagers, die durch nachfolgende Sedimentation wieder aufgefüllt werden. Das Wirtsgestein wird dadurch nicht beeinträchtigt. Die Eisbedeckungen führen zu erhöhten litho- und hydrostatischen Drücken, die eine noch andauernde Konvergenz beschleunigen.
44	1_x_x	Geologische Umgebung	Halokinese und subrosive Prozesse sind ohne Bedeutung. Magmatismus ist nicht zu erwarten. Die Reduzierung des Deckgebirges durch Erosion ist gering. Eine verstärkte Erosion wird erst im Zusammenhang mit einer späteren Vereisung erwartet. Die Erosion wird durch eine	Halokinese und subrosive Prozesse bleiben ohne Bedeutung. Die Reduzierung des Deckgebirges durch Erosion ist gering. Eine verstärkte Erosion wird erst im Zusammenhang mit einer späteren Vereisung in der nächsten Phase erwartet. Die Erosi-	Die erwarteten, klimatischen Veränderungen in dieser Phase reichen vom Permafrost bis ca. 200 Tiefe bis hin zur Eisüberfahung mit Rinnenbildung, die das Endlager bzw. ewG nicht erreichen, und folgender Füllung durch	Die erwarteten, klimatischen Veränderungen in dieser Phase sind das mehrfache Auftreten von Eiszeiten mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberfahrungen . Die hydraulischen Bedingungen des Deckgebirges werden dadurch

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			Sedimentation kompensiert. Klimaveränderungen mit höheren Niederschlägen werden erwartet.	on wird durch eine Sedimentation kompensiert. Die Klimaveränderungen mit höheren Niederschlägen werden erwartet.	Sedimentation. Die normalen Erosionsprozesse werden durch diese Veränderungen überlagert. Die hydraulischen Bedingungen des Deckgebirges (Grundwasserströme) werden dadurch nachhaltig verändert. Halokinese und subrosive Prozesse bleiben ohne Bedeutung für das Deckgebirge. Magmatismus wird nicht erwartet. Weitere Eiszeiten mit Permafrost oder Eisüberdeckung werden erst in der nächsten Phase erwartet.	mehrfach nachhaltig verändert. Halokinese und subrosive Prozesse bleiben dagegen ohne Bedeutung für das Deckgebirge. Magmatismus wird nicht erwartet.

### Anhang 7: Erwartete Entwicklung für den Endlagerstandort in Ton

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
1		Abfall	Die hochradioaktiven Abfälle sind:			
2		Abfall	- abgebrannte Brennelemente (direkte Endlagerung) sowie			
3		Abfall	- verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung			
4		Abfall	Die Brennelementtypen sind UO <sub>2</sub> - und MOX-Brennelemente sowohl aus Druck- als auch Siedewasserreaktoren sowie AVR- und THTR-Brennelementkugeln.			
5	3_4_3	Abfall	Die Radionuklide als der einzulagernde Abfall im engeren Sinne unterliegen dem radioaktiven Zerfall.	Der radioaktive Zerfall verringert die Radionuklidkonzentrationen.	Der radioaktive Zerfall verringert die Radionuklidkonzentration weiter.	Der radioaktive Zerfall verringert die Radionuklidkonzentration weiter.
6	3_4_1	Abfall	Der radioaktive Zerfall geht mit einer Wärmeproduktion einher und führt zur Aufheizung der Umgebung.	Die Wärmeproduktion und die Aufheizung der Umgebung ist abgeklungen.		

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
7	1_8_1	Abfall	Die Einstellung der chemischen Gleichgewichte mit Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) wird von physikalisch-chemischen Randbedingungen (pH, Zusammensetzung, Temperatur,...) bestimmt. Der Ablauf der Reaktionen ist ohne Anwesenheit von Lösungen / Feuchtigkeit vergleichsweise langsam. Die Mobilisierung der Radionuklide ist gering. Der Radionuklidtransport aus dem Abfall wird vorzugsweise diffusiv mit Ausnahme der gasförmigen Radionuklide stattfinden.	Die Einstellung der chemischen Gleichgewichte mit Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) wird von physikalisch-chemischen Randbedingungen (pH, Zusammensetzung, Temperatur,...) bestimmt. Der Ablauf der Reaktionen ist ohne Anwesenheit von Lösungen / Feuchtigkeit vergleichsweise langsam. Die Mobilisierung der Radionuklide ist gering. Der Radionuklidtransport aus dem Abfall wird vorzugsweise diffusiv mit Ausnahme der gasförmigen Radionuklide stattfinden. Mit Abnahme der Temperatur und der Aktivität verzögert sich die Einstellung der Gleichgewichte weiter.	Die Einstellung der chemischen Gleichgewichte mit Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) unter den gegebenen physikalisch-chemischen Randbedingungen (pH, Zusammensetzung, Temperatur,...) ist erfolgt.	Die Einstellung der chemischen Gleichgewichte mit Radionukliden (Kristallisation, Speziation,...) unter den gegebenen physikalisch-chemischen Randbedingungen (pH, Zusammensetzung, Temperatur,...) ist erfolgt.
8	3_2_3	Abfall	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall und Radiolyse ist unbedeutend.	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall und Radiolyse ist unbedeutend.	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall und Radiolyse ist unbedeutend.	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
9	3_2_1 3, 3_4_1, 3_4_9	Fixierungsmittel	Infolge der thermisch bereits im Reaktor induzierten Entmischungsvorgänge reichern sich einige Radionuklide, u.a. das hoch mobile <sup>129</sup> I an Korngrenzen und in Rissen innerhalb der Brennstoffmatrix (Pellets) sowie an den Spalten im Übergangsbereich zwischen Brennstoff und Hüllrohr und im Gasraum an. Einige Radionuklide sind besonders schnell, d.h. in der Größenordnung von Tagen bis einigen Jahren, in gelöster Form oder als Gas mobilisierbar. Sie werden der Instant Release Fraction (IRF) zugeordnet. Typische Spalt- und Aktivierungsprodukte, die einen relativ hohen Anteilen einer IRF haben, sind <sup>14</sup> C, <sup>129</sup> I, <sup>36</sup> Cl und <sup>135</sup> Cs.	Die thermisch induzierten Entmischungsvorgänge sind abgeschlossen. Die Anreicherung einiger Radionuklide, u.a. das hoch mobile <sup>129</sup> I an Korngrenzen und in Rissen innerhalb der Brennstoffmatrix (Pellets) sowie an den Spalten im Übergangsbereich zwischen Brennstoff und Hüllrohr und im Gasraum bleibt bestehen.	Die Anreicherung einiger Radionuklide, u.a. das hoch mobile <sup>129</sup> I an Korngrenzen und in Rissen innerhalb der Brennstoffmatrix (Pellets) sowie an den Spalten im Übergangsbereich zwischen Brennstoff und Hüllrohr und im Gasraum bleibt bestehen, ist aber durch Diffusion in die Umgebung verringert.	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
10	3_4_x	Fixierungsmittel	<p>Die Brennstoffmatrix aus UO<sub>2</sub> oder MOX unterliegt in Abwesenheit von Feuchtigkeit langsamen Veränderungsprozessen. Neben den temperaturbedingten Entmischungsvorgängen nach dem Abbrand treten auch strahlungsbedingte Veränderungen auf, die erst bei Lösungszutritt durch <math>\alpha</math>-Radiolyse des Wassers zu nennenswerten Radiolyseprodukten und lokal oxidierenden Bedingungen führen können. Eine Matrixkorrosion findet bei Anwesenheit oxidierender Spezies statt, die 4-wertiges Uran der UO<sub>2</sub>-Matrix zur 6-wertigen Form oxidieren kann.</p>	<p>Die Brennstoffmatrix aus UO<sub>2</sub> oder MOX selbst unterliegt in Abwesenheit von Feuchtigkeit langsamen Veränderungsprozessen. Neben den temperaturbedingten Entmischungsvorgängen nach dem Abbrand treten auch strahlungsbedingte Veränderungen auf, die erst bei Lösungszutritt durch <math>\alpha</math>-Radiolyse des Wassers zu nennenswerten Radiolyseprodukten führen können. Eine Matrixkorrosion findet bei Anwesenheit oxidierender Spezies statt, die 4-wertiges Uran der UO<sub>2</sub>-Matrix zur 6-wertigen Form oxidieren kann.</p>	<p>Die Brennstoffmatrix aus UO<sub>2</sub> oder MOX selbst unterliegt in Abwesenheit von Feuchtigkeit langsamen Veränderungsprozessen. Neben den temperaturbedingten Entmischungsvorgängen nach dem Abbrand treten auch strahlungsbedingte Veränderungen auf, die erst bei Lösungszutritt durch <math>\alpha</math>-Radiolyse des Wassers zu nennenswerten Radiolyseprodukten führen können. Eine Matrixkorrosion findet bei Anwesenheit oxidierender Spezies statt, die 4-wertiges Uran der UO<sub>2</sub>-Matrix zur 6-wertigen Form oxidieren kann.</p>	<p>Die Brennstoffmatrix aus UO<sub>2</sub> oder MOX selbst unterliegt in Abwesenheit von Feuchtigkeit langsamen Veränderungsprozessen. Neben den temperaturbedingten Entmischungsvorgängen nach dem Abbrand treten auch strahlungsbedingte Veränderungen auf, die erst bei Lösungszutritt durch <math>\alpha</math>-Radiolyse des Wassers zu nennenswerten Radiolyseprodukten führen können. Eine Matrixkorrosion findet bei Anwesenheit oxidierender Spezies statt, die 4-wertiges Uran der UO<sub>2</sub>-Matrix zur 6-wertigen Form oxidieren kann.</p>

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
11	3_4_2	Fixierungsmittel	<p>Die UO<sub>2</sub>-Matrix nimmt jedoch Oxidantien bis zu einem gewissen Maß auf, ohne durch einen oxidativen Auflösungsprozess instabil zu werden. Das Redox-Milieu im Kontaktbereich zwischen Lösung und Brennstoffabfällen bestimmt die Geschwindigkeit einer Brennstoffauflösung und auch die Löslichkeit der Radionuklide im Falle eines Lösungszutritts. Die reduzierenden Bedingungen bewirken eine niedrige Auflösungsrate der Brennstoffmatrix gegenüber Feuchtigkeit oder Lösungen.</p>	<p>Die UO<sub>2</sub>-Matrix nimmt jedoch Oxidantien bis zu einem gewissen Maß auf, ohne durch einen oxidativen Auflösungsprozess instabil zu werden. Das Redox-Milieu im Kontaktbereich zwischen Lösung und Brennstoffabfällen bestimmt die Geschwindigkeit einer Brennstoffauflösung und auch die Löslichkeit der Radionuklide im Falle eines Lösungszutritts. Die reduzierenden Bedingungen bewirken eine niedrige Auflösungsrate der Brennstoffmatrix gegenüber Feuchtigkeit oder Lösungen.</p>	<p>Die UO<sub>2</sub>-Matrix nimmt jedoch Oxidantien bis zu einem gewissen Maß auf, ohne durch einen oxidativen Auflösungsprozess instabil zu werden. Das Redox-Milieu im Kontaktbereich zwischen Lösung und Brennstoffabfällen bestimmt die Geschwindigkeit einer Brennstoffauflösung und auch die Löslichkeit der Radionuklide im Falle eines Lösungszutritts. Die reduzierenden Bedingungen bewirken eine niedrige Auflösungsrate der Brennstoffmatrix gegenüber Feuchtigkeit oder Lösungen.</p>	<p>Die UO<sub>2</sub>-Matrix nimmt jedoch Oxidantien bis zu einem gewissen Maß auf, ohne durch einen oxidativen Auflösungsprozess instabil zu werden. Das Redox-Milieu im Kontaktbereich zwischen Lösung und Brennstoffabfällen bestimmt die Geschwindigkeit einer Brennstoffauflösung und auch die Löslichkeit der Radionuklide im Falle eines Lösungszutritts. Die reduzierenden Bedingungen bewirken eine niedrige Auflösungsrate der Brennstoffmatrix gegenüber Feuchtigkeit oder Lösungen.</p>

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
12	1_8_1	Fixierungsmittel	Ein Teil der aus dem primären Brennstoffgefüge mobilisierten Radionuklide wird an neugebildeten Sekundärphasen (feste Umwandlungsprodukte des Brennstoffs) immobilisiert. Die Radionuklidmobilisierung erfolgt inkongruent, d.h. das Spektrum der mobilisierbaren bzw. mobilisierten Radionuklide entspricht nicht der durchschnittlichen Radionuklidzusammensetzung des Brennstoffs. Die internen Umbildungsprozesse sind bei Anwesenheit von Lösungen/Feuchtigkeit auch nach 10.000 Jahren noch nicht abgeschlossen.	Ein Teil der aus dem primären Brennstoffgefüge mobilisierbaren Radionuklide wird an neugebildeten Sekundärphasen (feste Umwandlungsprodukte des Brennstoffs) erneut immobilisiert. Im Fall eines Lösungszutritts weist die Radionuklidmobilisierung inkongruent, d.h. das Spektrum der mobilisierbaren Radionuklide entspricht nicht der durchschnittlichen Radionuklidzusammensetzung des Brennstoffs. Die wesentlichen, internen Umbildungsprozesse finden bei Anwesenheit von Lösungen/Feuchtigkeit weiterhin statt.	Ein Teil der aus dem primären Brennstoffgefüge mobilisierten Radionuklide wird an neugebildeten Sekundärphasen (feste Umwandlungsprodukte des Brennstoffs) immobilisiert. Die Radionuklidmobilisierung erfolgt inkongruent, d.h. das Spektrum der mobilisierbaren bzw. mobilisierten Radionuklide entspricht nicht der durchschnittlichen Radionuklidzusammensetzung des Brennstoffs. Die Umbildungsprozesse finden bei Anwesenheit von Lösungen/Feuchtigkeit weiterhin mit abnehmender Rate statt.	Die Umbildungsprozesse sind weitgehend abgeschlossen und ein geochemisches Gleichgewicht wird erreicht.
13	3_4_4, 1_6_2	Fixierungsmittel	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall oder Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Brennstoffmatrix gering. Der Gasabfluss erfolgt diffusiv.	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall oder Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Brennstoffmatrix gering und nimmt ab. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall oder Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Brennstoffmatrix gering und nimmt weiter ab. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	Die Gasbildung durch Korrosion, radioaktiven Zerfall oder Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist aufgrund der abgenommenen Aktivität

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
						sicherheitstechnisch ohne Bedeutung.
14	2_1_1 1	Fixierungsmittel	Das Fixierungsmittel Borosilikatglas bei HAW-(Glas-)Kokillen besitzt einen Anteil von etwa 10 % Boroxid und wird wegen der hohen Temperaturbeständigkeit und des geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten verwendet. Die Radionuklide der Prozesslösungen der Wiederaufarbeitung sind in die molekulare Struktur des Glases eingebunden. Koordinationspolyeder, Bindungsabstände und Bindungsenergien der in die Glasmatrix eingebauten Radionuklide sind ähnlich der von Kristallen, so dass die meisten Radionuklide homogen verteilt in fester Lösung (solid solution) in der Glasphase vorliegen.			
15	3_4_7, 3_1_3	Fixierungsmittel	Die Glasstruktur bildet durch die Temperaturänderungen Risse und den radioaktiven Zerfall amorphe Bereiche.	Die Glasstruktur hat Risse und durch den radioaktiven Zerfall amorphe Bereiche gebildet.	Der radioaktive Zerfall beeinträchtigt weiterhin die Glasstruktur durch Bildung von Rissen und amorphen Bereichen. Eine teilweise	

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
					Rekristallisation findet statt.	
16	1_8_1	Fixierungsmittel	In Abwesenheit von Lösungen oder Feuchtigkeit findet lediglich eine langsame Umwandlung der Glasmatrix statt, die durch den Energieeintrag aufgrund des Zerfalls der Radionuklide beeinflusst wird (Metamiktisierung). Die Mobilität der Radionuklide innerhalb der Glasmatrix wird durch Diffusionsprozesse auf Grenzflächen innerhalb von Rissen dominiert. Heterogene Bereiche bilden sich durch die Rekristallisation und Entmischung aus. Die Glasmatrix zersetzt sich bei Anwesenheit von Lösungen und setzt Radionuklide frei. Es bilden sich Sekundärphasen, die Radionuklide einschließen können.	Die verglasten Abfälle haben unter teilweiser Umwandlung der originalen Glasstruktur Sekundärphasen unter Einschluss der Radionuklide gebildet. Die Mobilität der Radionuklide innerhalb der Glasmatrix wird durch Diffusionsprozesse auf Grenzflächen innerhalb von Rissen dominiert. Heterogene Bereiche bilden sich durch die Rekristallisation aus. Die Glasmatrix zersetzt sich bei Anwesenheit von Lösungen und setzt Radionuklide frei. Es bilden sich Sekundärphasen, die Radionuklide einschließen können.	Die verglasten Abfälle haben unter teilweiser Umwandlung der originalen Glasstruktur Sekundärphasen unter Einschluss der Radionuklide gebildet. Die Mobilität der Radionuklide innerhalb der Glasmatrix wird durch Diffusionsprozesse auf Grenzflächen innerhalb von Rissen dominiert. Heterogene Bereiche bilden sich durch die Rekristallisation aus.	Die verglasten Abfälle haben unter weitgehender Umwandlung der originalen Glasstruktur Sekundärphasen unter Einschluss der Radionuklide gebildet. Die Mobilität der Radionuklide innerhalb der Glasmatrix wird durch Diffusionsprozesse auf Grenzflächen innerhalb von Rissen dominiert. Heterogene Bereiche bilden sich durch die Rekristallisation aus.

<b>Nr.</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
17	3_2_3	Fixierungsmittel	Die Gasbildung aus Zerfallsprodukten und Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Glasmatrix gering. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	Die Gasbildung aus Zerfallprodukten und Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Glasmatrix gering. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	Die Gasbildung aus Zerfallprodukten und Radiolyse von Feuchtigkeitsspuren ist in der Glasmatrix gering. Der Gasfluss erfolgt diffusiv.	-
18	3_2_6	Fixierungsmittel	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils und der fehlenden Feuchtigkeit nicht vorhanden.	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils nicht vorhanden.	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils nicht vorhanden.	-
19	3_4_8, 3_4_9	Fixierungsmittel	Aktivierungsprodukte werden aus korrodierenden Metallbestandteilen freigesetzt	Aktivierungsprodukte werden aus korrodierenden Metallbestandteilen freigesetzt	Aktivierungsprodukte werden aus korrodierenden Metallbestandteilen freigesetzt	
20	3_2_1 4	Fixierungsmittel	Wechselwirkungen zwischen den Abfallkategorien finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den Abfallkategorien finden aufgrund der Abstände und des geringen Transports nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den Abfallkategorien finden aufgrund der Abstände und des geringen Transports nicht statt.	-

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
21	2_1_1, 3_2_5	Abfallbehälter	Die Kokillenbehälter aus Stahl, bzw. das Abfallgebände aus Stahl und Beton halten dem auflaufenden Gebirgsdruck in den ersten 10000 Jahren stand. Der Korrosionsfortschritt an Stahl und Beton ist unter trockenen Verhältnissen langsam. Einzelne Abfallbehälter werden nicht in der vorgesehenen Position liegen bzw. weisen Behälter- oder Materialdefekte auf.	Die Kokillenbehälter aus Stahl, bzw. das Abfallgebände aus Stahl und Beton haben ihre Barrierenwirkung durch geomechanische Einwirkungen und Korrosion größtenteils verloren. Die Verfügbarkeit von Porenlösung nach Wiederaufsättigung des Versatzes führt zur verstärkter Korrosion des Abfallbehälters und Gasbildung. Die Korrosionsprodukte halten Radionuklide durch Sorption zurück. Gebildete Gase können diffusiv entweichen.	Die Kokillenbehälter aus Stahl, bzw. das Abfallgebände aus Stahl und Beton haben ihre Barrierenwirkung durch geomechanische Einwirkungen und Korrosion vollständig verloren. Durch die Wiederaufsättigung des Versatzes entstehen Korrosionsprodukte und Gase aus dem Abfallbehälter. Die Korrosionsprodukte halten Radionuklide durch Sorption zurück. Gebildete Gase können diffusiv entweichen.	Der Abfallbehälter ist vollständig korrodiert. Die Korrosionsprodukte halten Radionuklide durch Sorption zurück. Gebildete Gase sind diffusiv entwichen.
22	3_2_6	Abfallbehälter	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils im Abfallbehälter nicht vorhanden.	Mikrobielle Effekte sind aufgrund des fehlenden organischen Anteils im Abfallbehälter nicht vorhanden.		

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
23	2_1_1, 2_1_2, 2_1_3	Abfallbehälter	Die Brennelementbehälter aus dickwandigem Stahl sind so ausgelegt, dass sie dem Gebirgsdruck standhalten. Aufgrund von anfänglichen Defekten sind vereinzelte Behälter undicht. Die erwartete Lebensdauer der übrigen Behälter wird erst ab dem Zeitpunkt der Wiederaufsättigung beeinflusst und ist von der Korrosionsrate der Behälter abhängig. Die Korrosionsrate ist wiederum von der Lösungszusammensetzung abhängig.	Die Brennelementbehälter sind aus dickwandigem Stahl und so ausgelegt, dass sie einem Gebirgsdruck standhalten. Die gebirgsmechanische Einwirkungen führen daher nur in Verbindung mit einer Korrosion zu einem Ausfall. Weitere Undichtigkeiten von Behältern treten gegen Ende des Zeitraums auf. Die Korrosionsprodukte tragen ihrerseits zur Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption und Einstellung niedriger Löslichkeiten bei.	Die Brennelementbehälter sind durch Korrosion und gebirgsmechanische Einwirkungen undicht. Die Korrosionsprodukte tragen ihrerseits zur Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption und Einstellung niedriger Löslichkeiten bei.	Der Abfallbehälter ist vollständig korrodiert. Die Korrosionsprodukte halten Radionuklide durch Sorption zurück.
24	2_1_1, 2_1_2, 2_1_3	Abfallbehälter	Ohne Feuchtigkeit oder Lösungen werden sehr geringe Korrosionsraten erwartet, die rechnerisch auf lange Standzeiten über 100 000 Jahre führen. Ein früherer Ausfall weniger Behälter hat durch andere Ereignisse, z.B. durch Rissbildung durch Alterung, fehlerhafte Dichtungen oder mangelhafte Qualität einzelner Behälter stattgefunden.	Die Wiederaufsättigung des Versatzes begünstigt eine Korrosion mit Gasbildung. Die Gasbildung und die Wiederaufsättigung beeinflussen sich gegenseitig.		

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
			Die Wiederaufsättigung des Versatzes begünstigt eine Korrosion mit Gasbildung.			
25	3_4_1	Abfallbehälter	Der Behälter leitet die Zerfallswärme in den Versatz und das umgebende Gestein ab.			
26	3_2_1 4	Abfallbehälter	Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallbehältern finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallbehältern finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallbehältern finden aufgrund der Abstände und des fehlenden Transportmediums nicht statt.	
27	3_3_4	Abfallbehälter	Veränderungen der Abfallbehälter, wie z.B. Versprödung, finden aufgrund des radioaktiven Zerfalls und der Temperaturentwicklung statt.			

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
28	1_7_6	Abfallbehälter	Die Festkörperdiffusion von Radionukliden ist auf die Abfallbehälter beschränkt. Die Diffusion von Radionukliden aus undichten Brennelementbehälter ist auf das nähere Umfeld der Abfallbehälter beschränkt.	Die Diffusion von Radionukliden aus undichten Brennelementbehälter ist auf das nähere Umfeld der Abfallbehälter beschränkt.	Die Diffusion von Radionukliden ist auf den Einlagerungsbereich beschränkt.	Die Diffusion von Radionukliden ist auf den einschlußwirksamen Gebirgsbereich beschränkt.
29		Versatz	Die im Grubengebäude geschaffenen Hohlräume werden bei der Schließung des Endlagers, bzw. einzelner Einlagerungsfelder mit Bentonit / Quarzsand als Versatz zur Einbettung der Behälter, Stützung der Grube, Verhinderung und Verzögerung von denkbaren Lösungsflüssen, Pufferung eines chemischen Milieus und Minimierung von Hohlräumen verfüllt. Für die Einlagerungsstrecken der Brennelementbehälter ist dabei ein trockener Bentonitversatz vorgesehen.	-	-	-

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
30	3_4_7, 2_1_7, 2_1_1 0	Versatz	Die Auflockerung der Randzonen des Gebirges um die versetzten Hohlräume schreitet fort bis die Konvergenz des Gebirges auf den Versatz aufläuft und diesen kompaktiert. Die erhöhte Temperatur durch Einlagerung der Abfälle beschleunigt die Konvergenz.	Der Versatz ist kompaktiert und die Porosität verringert. Eine Stützwirkung ist erreicht. Die Konvergenz ist weitgehend abgeklungen. Der Versatz hat die gebirgsmechanischen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erreicht.	Der Versatz erfährt keine weiteren Veränderungen hinsichtlich Kompaktion und Porosität.	Der Versatz erfährt keine weiteren Veränderungen hinsichtlich Kompaktion und Porosität.
31	2_3_8, 2_1_1 0	Versatz	Durch die Kompaktion und Quellung baut der Versatz einen Stützdruck auf. Gleichzeitig verringern sich die Porosität und die Durchlässigkeit für Lösungen. Diese Entwicklung verläuft anfänglich inhomogen. Mit dem Auflaufen des Gebirges auf den Versatz verheilen die aufgelockerten Randzonen.	Die Auflockerung der Randzonen ist durch das Auflaufen des Gebirges auf den Versatz zurückgebildet.	-	-

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
32	1_6_2, 1_7_x	Versatz	Radionuklide diffundieren aus den Abfallbehältern in den Bentonit. Die physikalisch-chemischen Reaktionen im Bentonit, wie Auflösung und Ausfällung von Radionukliden, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption sind aufgrund der fehlenden Feuchtigkeit zunächst ohne Bedeutung. Die physikalisch-chemischen Bedingungen (Temperatur, Redoxpotenzial) und Eigenschaften (Mineralzusammensetzung) nach der Wiederaufsättigung begünstigen die Rückhaltung von Radionukliden im Bentonit aufgrund der physikalisch-chemischen Wechselwirkungen.	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen der Radionuklide im Bentonit (Auflösung, Ausfällung, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption) tragen zur Rückhaltung bei.	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen der Radionuklide im Bentonit (Auflösung, Ausfällung, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption) tragen zur Rückhaltung bei.	Der Versatz hat seine Bedeutung zur Rückhaltung von Radionukliden verloren.
33	1_8_3, 3_2_1 0	Versatz	Ein Gasdruckaufbau im Bentonit findet wegen der Diffusion, Lösung im Porenwasser oder Advektion nicht statt. Mikrobielle Effekte sind wegen der fehlenden bzw. zu geringen Feuchtigkeit unbedeutend.	Ein Gasdruckaufbau im Bentonit findet nicht statt, da durch Diffusion oder Advektion eine Ableitung erfolgt. Ein geringer Anteil der organischen Bestandteile der Porenlösung werden mit Sulfaten mikrobiell umgesetzt.	Ein Gasdruckaufbau im Bentonit findet nicht statt, da durch Diffusion oder Advektion eine Ableitung erfolgt. Ein geringer Anteil der organischen Bestandteile der Porenlösung werden mit Sulfaten mikrobiell umgesetzt.	-

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
34	2_1_1 4	Versatz	Die Zusammensetzung des Porenwassers ist vergleichsweise hoch mit Mineralsalzen angereichert. Der pH ist neutral bis schwach alkalisch und das Redox-Potenzial reduzierend. Der organische Anteil dürfte bei wenigen mg/l liegen.	Die Zusammensetzung des Porenwassers ist vergleichsweise hoch mit Mineralsalzen angereichert. Der pH ist neutral bis schwach alkalisch und das Redox-Potenzial reduzierend. Der organische Anteil dürfte bei wenigen mg/l liegen.	Die Zusammensetzung des Porenwassers ist vergleichsweise hoch mit Mineralsalzen angereichert. Der pH ist neutral bis schwach alkalisch und das Redox-Potenzial reduzierend. Der organische Anteil dürfte bei wenigen mg/l liegen.	-
35	3_2_2	Versatz	Die Wechselwirkung von Porenwasser, Korrosion der Abfallgebinde und dem Versatz führen zu mineralogischen Veränderungen im Versatz und umgebenden Wirtsgestein, die sich auf wenige m des Nahfeldes beschränken.	Die Wechselwirkung von Porenwasser, Korrosion der Abfallgebinde und dem Versatz führen zu mineralogischen Veränderungen im Versatz und umgebenden Wirtsgestein, die sich auf wenige m des Nahfeldes beschränken. Die mikrobiellen Einflüsse sind aufgrund der Kompaktion weiter abnehmend.		

<b>Nr.</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
36	2_1_4, 2_1_5	Geotechnische Barrieren	Der Gebirgsdruck läuft auf die Streckenverschlüsse auf und beansprucht diese mechanisch. Zusätzlich wirken die Zerfallswärme der Abfälle und Gasdrücke auf die Streckenverschlüsse. Die vorgesehene Funktion der Streckenverschlüsse bleibt erhalten. Einige wenige Streckenverschlüsse werden ihre Funktion wegen Materialdefekten, Qualitätsmängel oder Ausfall nur unvollständig erfüllen.	Die mechanische Beanspruchung der Streckenverschlüsse hat zu Rissen geführt, die die Durchlässigkeit gegenüber Lösungen erhöhen. Die geomechanische Stabilisierung ist weiterhin gegeben.	Die geotechnischen Barrieren (Streckenverschlüsse) erfahren keine weiteren Veränderungen.	Die geotechnischen Barrieren (Streckenverschlüsse) erfahren keine weiteren Veränderungen.
37	2_1_1 0	Geotechnische Barrieren	Die aufgelockerten Randzonen des Gebirges (EDZ) im Bereich der geotechnischen Barrieren verheilen durch den Gebirgsdruck.	Die EDZ ist verheilt.	Die EDZ ist verheilt.	Die EDZ ist verheilt.
38	2_3_8	Geotechnische Barrieren	Die Auffättigung des Bentonits und Herstellung der Dichtwirkung der Streckenverschlüsse durch Quellung erfolgt durch das Porenwasser des umgebenden Wirtsgesteins.	Der Bentonit ist aufgesättigt.		
39	3_2_6	Geotechnische Barrieren	Geringe Gasmengen werden durch mikrobielle Umsetzung von organischen Bestandteilen mit Oxidantien gebildet.			

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
40	1_6_1	Weitere Barrieren	Es findet keine Advektion von Fluiden im Grubengebäude statt.	Es findet keine Advektion von Fluiden im Grubengebäude statt.		
41	2_1_7, 3_3_2, 1_2_6, 1_2_1, 1_2_1 2, 1_6_1	Einschlußwirksamer Gebirgsbereich	Der Gesteinskörper dehnt sich temperaturbedingt aus. Die Konvergenz des Gebirges beeinflusst den ewG nicht. Störungen, Risse oder Klüfte bilden sich nicht aus. Die Gesteinheterogenität und Subsidenz ist unbedeutend. Das Grundwasser erreicht den ewG nicht. Änderungen des Spannungsfeldes werden vom ewG durch Kriechen des Gesteins kompensiert. Kein advektiver Transport von Fluiden.	Der einschlußwirksame Gebirgsbereich bleibt in seinen Eigenschaften erhalten. Die temperaturbedingte Ausdehnung ist zurückgegangen. Kein advektiver Transport von Fluiden.	Der einschlußwirksame Gebirgsbereich bleibt in seinen Eigenschaften erhalten. Kein advektiver Transport von Fluiden.	Der einschlußwirksame Gebirgsbereich bleibt in seinen Eigenschaften erhalten. Kein advektiver Transport von Fluiden.
42	1_7_4, 1_7_8, 1_7_6, 1_7_9	Einschlußwirksamer Gebirgsbereich	-	-	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen der Radionuklide im ewG (Auflösung, Ausfällung, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption) tragen zur Rückhaltung bei.	Die physikalisch-chemischen Wechselwirkungen der Radionuklide im ewG (Auflösung, Ausfällung, Bildung von Kolloiden, Sorption und Desorption) tragen zur Rückhaltung bei.

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
43	2_1_4, 2_1_5, 2_2_3,	Schachtverschluß	Das Verschlussbauwerk wird den Anforderungen entsprechend erstellt und erfüllt diese. Der Aufbau des Schachtverschluß aus Bentonit/Sand/Kies-Gemisch erfüllt seine Dichtwirkung durch die Aufsättigung mit Porenwasser aus dem Wirtsgestein. Erst nach 10000 Jahren ist durch Alterung ein Nachlassen der Dichtigkeit des Schachtverschluß zu unterstellen.	Der Schachtverschluß hat den vorgesehenen Wirkungszeitraum erreicht. Durch gebirgsmechanische Einwirkungen sind die Eigenschaften hinsichtlich der Durchlässigkeit gegenüber Lösungen verschlechtert.	Das Auftreten einer Eiszeit mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberfahung läßt Rinnen erwarten, die durch nachfolgende Sedimentation wieder aufgefüllt werden. Eine Rinnenbildung hat den Verlust des Schachtverschlußes zur Folge.	Der Schachtverschluß ist nicht mehr vorhanden
44	2_1_6	Schachtverschluß	Geomechanische Vorgänge beeinträchtigen die Wirksamkeit des Schachtverschlußes nicht.	-	-	-
45	1_7_4, 1_8_1	Schachtverschluß	-	Eine Rückhaltung von Radionukliden am Baumaterial bzw. an Umwandlungsprodukten findet durch physikalisch-chemische Wechselwirkungen statt.	Eine Rückhaltung von Radionukliden am Baumaterial bzw. an Umwandlungsprodukten findet durch physikalisch-chemische Wechselwirkungen statt.	-

Nr.	FEP-Nr.	Komponente (Barrieren)	Entwicklung 0-10000	Entwicklung 10000-50000	Entwicklung 50000-150000	Entwicklung 150000-1000000
46	1_2_x, 1_5_x,	Wirtsgestein	Tektonische Vorgänge werden für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Die Konvergenz findet statt. Die Bildung von Störungen, Rissen oder sonstigen Diskontinuitäten ist unbedeutend. Der Grundwasserfluss bleibt im Wesentlichen unverändert. Das Wirtsgestein ist mit Ausnahme der EDZ mit Porenwasser gesättigt. Die EDZ wird aufgesättigt.	Tektonische Vorgänge werden für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Ein Diapirismus ist unbedeutend. Das Wirtsgestein und die EDZ ist aufgesättigt.	Tektonische Vorgänge werden für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Ein Diapirismus ist unbedeutend. Das Auftreten einer Eiszeit mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberfahung hat Rinnen zur Folge, die durch nachfolgende Sedimentation wieder aufgefüllt werden. Das Wirtsgestein und der ewG wird dadurch nicht beeinträchtigt. Eine Eisbedeckung führt zu einem erhöhten litho- und hydrostatischen Druck, der eine noch andauernde Konvergenz beschleunigt.	Tektonische Vorgänge werden für den gesamten Zeitraum nicht erwartet. Der Diapirismus bleibt unbedeutend. Das mehrfache Auftreten von Eiszeiten mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberfahung lässt weitere Rinnen im Umfeld des Endlagers erwarten, die durch nachfolgende Sedimentation wieder aufgefüllt werden. Das Wirtsgestein wird dadurch nicht beeinträchtigt. Die Eisbedeckungen führen zu erhöhten litho- und hydrostatischen Drücken, die eine noch andauernde Konvergenz beschleunigen.

<b>Nr .</b>	<b>FEP-Nr.</b>	<b>Komponente (Barrieren)</b>	<b>Entwicklung 0-10000</b>	<b>Entwicklung 10000-50000</b>	<b>Entwicklung 50000-150000</b>	<b>Entwicklung 150000-1000000</b>
47	1_x_x	Geologische Umgebung	Erdbeben sind ohne Auswirkungen auf die geologische Umgebung. Magmatismus tritt nicht auf. Die Reduzierung des Deckgebirges durch Erosion ist gering. Eine verstärkte Erosion wird erst im Zusammenhang mit einer späteren Vereisung erwartet. Die Erosion wird durch Sedimentation kompensiert. Klimaveränderungen sind mit höheren Niederschlägen verbunden.	Erdbeben sind ohne Auswirkungen auf die geologische Umgebung. Magmatismus ist nicht zu erwarten. Die Reduzierung des Deckgebirges durch Erosion ist gering. Eine verstärkte Erosion wird erst im Zusammenhang mit einer späteren Vereisung in der nächsten Phase erwartet. Die Erosion wird durch eine Sedimentation kompensiert. Klimaveränderungen sind mit höheren Niederschlägen verbunden.	Die klimatischen Veränderungen in dieser Phase reichen vom Permafrost bis ca. 200 Tiefe bis hin zur Eisüberfahung mit Rinnenbildung und nachfolgender Auffüllung durch Sedimentation. Die normalen Erosionsprozesse werden durch diese Veränderungen überlagert. Die hydraulischen Bedingungen des Deckgebirges werden dadurch nachhaltig verändert. Magmatismus tritt nicht auf. Weitere Eiszeiten mit Permafrost oder Eisüberdeckung werden erst in der nächsten Phase erwartet.	Die klimatischen Veränderungen in dieser Phase sind das mehrfache Auftreten von Eiszeiten mit Permafrost bis hin zur Gletscherüberfahrungen. Die hydraulischen Bedingungen des Deckgebirges werden dadurch mehrfach nachhaltig verändert. Magmatismus wird nicht erwartet.

Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponenten

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Abfall	
		1	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Beständigkeit der Glasmatrix gegenüber zutretender Lösung (Glaskorrosion) SF_20
1_6_7	Onsager Prozesse	A	
1_7_2	Chemische Gleichgewichtsreaktion	3	
1_7_3	Radionuklidtransport	1	x
1_7_4	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen	1	x
1_7_5	Auflösung und Ausfällung von Radionukliden	1	x
1_7_6	Sorption und Desorption	1	x
1_7_7	Komplexbildner	1	
1_7_8	Kolloidaler Radionuklidtransport	1	
1_8_1	Chemische Umwandlung	1	x
1_8_3	Mikrobielle Wechselwirkungen	1	x
2_1_11	Auflösung der Glasmatrix, Brennstoffmatrix, Korrosion	1	x
2_1_13	Eigenschaften Systemkomponenten	1	x
2_1_14	Zusammensetzung Systemkomponenten	1	x
3_1_3	Induzierte chemische Änderungen	1	x
3_2_3	Gasentwicklung	1	
3_2_4	Auslaugung	1	x
3_2_6	Mikrobielle Effekte	1	x
3_2_7	Redox-Potenzial, pH	1	x
3_2_10	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen	1	
3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	1	
3_2_13	Speziation der Radionuklide	1	
3_2_14	Wechselwirkung zwischen Abfallkategorien	1	
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	1	x
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	1	x
3_4_3	Radioaktiver Zerfall/ Anstieg der Konzentration an Zerfallsprodukten und der Aktivität	1	x
3_4_4	Radiolyse	1	
3_4_8	Strahlungsinduzierte Aktivierung	1	
3_4_9	Inventar, Radionuklide, Mobilisierung, Quellterm	1	x

Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponenten

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Fixierungsmittel	
		2	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Beständigkeit der Glasmatrix gegenüber zutretender Lösung (Glaskorrosion)
1_6_7	Onsager Prozesse	FM	SF_21
1_7_2	Chemische Gleichgewichtsreaktion	3	
1_7_3	Radionuklidtransport	1	x
1_7_4	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen	1	x
1_7_5	Auflösung und Ausfällung von Radionukliden	1	x
1_7_6	Sorption und Desorption	1	x
1_7_7	Komplexbildner	1	
1_7_8	Kolloidaler Radionuklidtransport	1	
1_8_1	Chemische Umwandlung	1	x
2_1_3	Materialdefekte	1	
2_1_4	Verminderte Qualität bei der Konstruktion	1	
2_1_11	Auflösung der Glasmatrix, Brennstoffmatrix, Korrosion	1	x
2_1_13	Eigenschaften Systemkomponenten	1	x
2_1_14	Zusammensetzung Systemkomponenten	1	x
3_1_3	Induzierte chemische Änderungen	1	x
3_2_3	Gasentwicklung	1	
3_2_4	Auslaugung	1	x
3_2_6	Mikrobielle Effekte	1	x
3_2_7	Redox-Potenzial, pH	1	x
3_2_10	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen	1	
3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	1	
3_2_13	Speziation der Radionuklide	1	
3_2_14	Wechselwirkung zwischen Abfallkategorien	1	
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	1	x
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	1	x
3_4_3	Radioaktiver Zerfall/ Anstieg der Konzentration an Zerfallsprodukten und der Aktivität	1	x
3_4_4	Radiolyse	1	
3_4_8	Strahlungsinduzierte Aktivierung	1	
3_4_9	Inventar, Radionuklide, Mobilisierung, Quellterm	1	x

Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Abfallbehälter						Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption
		4	SF_7 Geomechanische Stabilisierung: Schutz vor geomechanischen Einflüssen von Außen	SF_9 Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	SF_11 Begrenzung der Gasbildung: Begrenzung der Gasbildungsrate (Korrosion) und Gasmenge	SF_14 Temperaturbegrenzung /Integritätserhalt: Ableitung der Zerfallswärme	SF_19	
1_2_1	Kriechen des Gesteins	AB	x					
1_7_2	Chemische Gleichgewichtsreaktion	1						x
1_7_3	Radionuklidtransport	1						x
1_7_4	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen	1						x
1_7_5	Auflösung und Ausfällung von Radionukliden	1						x
1_7_6	Sorption und Desorption	1						x
1_7_7	Komplexbildner	1						
1_7_8	Kolloidaler Radionuklidtransport	1						
1_8_1	Chemische Umwandlung	1						x
1_8_3	Mikrobielle Wechselwirkungen	1						
2_1_1	Behälterdefekte	1	x	x				
2_1_2	Behälterausfall	1	x	x				x
2_1_3	Materialdefekte	1	x	x				x
2_1_4	Verminderte Qualität bei der Konstruktion	1	x	x				x
2_1_5	Versagen der Abdichtung	1	x	x				
2_1_11	Auflösung der Glasmatrix, Brennstoffmatrix, Korrosion	1		x				
2_1_13	Eigenhaften Systemkomponenten	1	x	x				x
2_1_14	Zusammensetzung Systemkomponenten	1	x	x				x
2_2_3	Verminderte Verschlussfunktion	1		x				
3_1_3	Induzierte chemische Änderungen	1		x				
3_2_3	Gasentwicklung	1		x				
3_2_4	Auslaugung	1		x				
3_2_5	Metallkorrosion	1		x				x
3_2_6	Mikrobielle Effekte	1						
3_2_7	Redox-Potenzial, pH	1		x				x
3_2_8	Zündfähige Gasgemische	1						
3_2_10	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen	1						
3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	1						
3_2_12	Gasphasenbildung, Gasdruckaufbau	1						
3_2_13	Speziation der Radionuklide	1						x
3_2_14	Wechselwirkung zwischen Abfallkategorien	1						
3_3_1	Gebinde- und Behälterbewegung	1	x					
3_3_2	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	1	x					
3_3_3	Hohlraumkonvergenz	3	x					
3_3_4	Versprödung, Rissbildung	1	x					
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	1	x					x
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	1		x				
3_4_4	Radiolyse	1						x
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	1	x					
3_4_8	Strahlungsinduzierte Aktivierung	1						
3_4_9	Inventar, Radionuklide, Mobilisierung, Quellterm	1						x



Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponent

GRS_FEP_NR		GRS_FEP_NAME	geotechnische Barrieren				
7			Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des Wirtsgesteins	Geomechanische Stabilisierung: Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke, ggf. des Bentonitquelldrucks des Versatzes (Tonsteinkonzent))	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption
BE			SF_1	SF_3	SF_9	SF_10	SF_19
1_2_1	2	Kriechen des Gesteins		x			
1_2_13	3	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten			x		
1_6_1	1	Advektion, Konvektion, Dispersion				x	
1_6_2	1	Diffusion					
1_6_3		Verdünnung					
1_6_4	1	Gasinduzierter Transport				x	
1_7_2	1	Chemische Gleichgewichtsreaktion					x
1_7_3	2	Radionuklidtransport					x
1_7_4	1	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen					x
1_7_5	1	Auflösung und Ausfällung von Radionukliden					x
1_7_6	1	Sorption und Desorption				x	
1_7_7	1	Komplexbildner					x
1_7_8	1	Kolloidaler Radionuklidtransport					x
1_8_1	1	Chemische Umwandlung				x	
1_8_3	1	Mikrobielle Wechselwirkungen			x		
2_1_3	1	Materialdefekte			x		
2_1_4	1	Verminderte Qualität bei der Konstruktion			x		
2_1_5	1	Versagen der Abdichtung			x		
2_1_6	3	Änderungen des Spannungsfeldes	x				
2_1_7	1	Thermische Effekte					
2_1_12	1	Verdunstung/ Kondensation von Wasser			x		
2_1_13	1	Eigenschaften Systemkomponenten					
2_1_14	1	Zusammensetzung Systemkomponenten					
2_2_3	1	Verminderte Verschlussfunktion			x		
3_1_1	2	Dehydratation von Salzmineralien					
3_1_3	2	Induzierte chemische Änderungen					x
3_1_5	1	Nicht-elastisches Ansprechverhalten	x				
3_2_3	2	Gasentwicklung		x		x	
3_2_4	2	Auslaugung					x
3_2_7	1	Redox-Potenzial, pH				x	
3_2_10	1	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen		x		x	
3_2_11	1	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung		x		x	
3_2_13	1	Speziation der Radionuklide					x
3_3_2	1	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	x				
3_3_3	1	Hohlräumkonvergenz	x				
3_3_5	1	Bruch- / Rissbildung	x			x	
3_3_6	1	Wiederanpassung des Wirtsgesteins an Trennfugen	x				
3_3_7	1	Vorliegen und Verbindung von Resthohlräumen	x				
3_3_8	2	Volumenänderung	x				

Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponenten

geotechnische Barrieren							
GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	7	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins	Geomechanische Stabilisierung: Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke, ggf. des Bentonitquelldrucks des Versatzes (Tonsteinkonzent))	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption
		BE	SF_1	SF_3	SF_9	SF_10	SF_19
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	2					
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	1			x		
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	1					

Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponenten

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Weitere Barrieren				Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption
		9	Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des Wirtsgesteins	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	
		WB	SF_1	SF_9	SF_10	SF_19
1_2_1	Kriechen des Gesteins	2	x			
1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Klufsystemen)	2	x	x		
1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	3	x	x		
1_4_1	Rinnenbildung	3				
1_6_1	Advektion, Konvektion, Dispersion	1		x	x	x
1_6_2	Diffusion	1			x	x
1_6_4	Gasinduzierter Transport	1			x	
1_7_2	Chemische Gleichgewichtsreaktion	1				x
1_7_3	Radionuklidtransport	2				x
1_7_4	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen	1			x	x
1_7_5	Auflösung und Ausfällung von Radionukliden	1			x	x
1_7_6	Sorption und Desorption	1			x	x
1_7_7	Komplexbildner	1				x
1_7_8	Kolloidaler Radionuklidtransport	1				x
1_8_1	Chemische Umwandlung	1			x	x
1_8_3	Mikrobielle Wechselwirkungen	1			x	x
2_1_3	Materialdefekte	1				
2_1_4	Verminderte Qualität bei der Konstruktion	1				
2_1_5	Versagen der Abdichtung	1		x		
2_1_6	Änderungen des Spannungsfeldes	3	x	x		
2_1_7	Thermische Effekte	2				
2_1_12	Verdunstung/ Kondensation von Wasser	2			x	
2_1_13	Eigenhaften Systemkomponenten	1				
2_1_14	Zusammensetzung Systemkomponenten	1				
2_2_2	Unzureichende Versatzkompaktion (Hohlraumvolumen)	1	x			
2_2_3	Verminderte Verschlussfunktion	1		x		
2_3_8	Wiederaufsättigung	1			x	x
3_1_1	Dehydratation von Salzmineralien	2				
3_1_3	Induzierte chemische Änderungen	2				x
3_1_5	Nicht-elastisches Anspreverhalten	1				
3_2_4	Auslaugung	2				x
3_2_7	Redox-Potenzial, pH	1			x	x
3_2_10	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen	1			x	
3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	1			x	
3_2_12	Gasphasenbildung, Gasdruckaufbau	1			x	
3_2_13	Speziation der Radionuklide	1			x	x
3_3_2	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	1	x			
3_3_3	Hohlraumkonvergenz	2	x	x		
3_3_5	Bruch- / Rissbildung	1		x		
3_3_6	Wiederanpassung des Wirtsgesteins an Trennfugen	1	x	x		
3_3_7	Vorliegen und Verbindung von Resthohlräumen	1	x			
3_3_8	Volumenänderung	2				
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	2				
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	1				
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	1				



Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomp

GRS_FEP_NR		Schachtverschluss					GRS_FEP_NAME	
13		Geomechanische Stabilisierung: Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins	Geomechanische Stabilisierung: Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke, ggf. des Bentonitquelldrucks des Versatzes (Tonsteinkonzent))	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption		
SV		SF_1	SF_3	SF_9	SF_10	SF_19		
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	2						
3_4_2	Änderungen der Materialeigenschaften	1		x				
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	2						





Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponen

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Wirtsgestein				Integritätserhalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption
		14	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	SF_4	SF_8				
1_2_1	Kriechen des Gesteins	WG							
1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik	1	x			x			
1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	1	x		x				
1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	1	x			x			
1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Klufsystemen)	1	x			x			
1_2_9	Gesteinsheterogenitäten	1	x			x			
1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	1	x			x			
1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	1	x			x			
1_2_16	Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften	1	x			x		x	
1_3_2	Klimatische Variabilität	2	x		x				
1_3_3	Extremer Niederschlag	2	x			x			
1_3_4	Kaltzeit (Glazial)	1	x			x			
1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)	1	x			x			
1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")	2	x			x			
1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem	2				x			
1_4_1	Rinnenbildung	1	x			x			
1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung	2			x				
1_4_5	Subrosion	1			x				
1_5_1	Änderungen des Flusslaufs, Wasserspiegel im See	2				x			
1_5_2	Flutung	2				x			
1_5_5	Grundwasserfluss	1				x			
1_5_6	Grundwassererneuerung	1				x			
1_5_8	Effekte der Subrosion	1			x				
1_6_2	Diffusion	1					x		
1_6_3	Verdünnung	1							
1_6_4	Gasinduzierter Transport	1					x		
1_6_5	Matrixdiffusion	1					x		
1_6_6	Mehrphasenfluss	2					x		
1_6_7	Onsager Prozesse	2							
1_7_2	Chemische Gleichgewichtsreaktion	1					x		
1_7_3	Radionuklidtransport	3					x		
1_7_4	physikalisch-chemische Eigenschaften, die das chemische Gleichgewicht beeinflussen	1					x		
1_7_5	Auflösung und Ausfällung von Radionukliden	1							
1_7_6	Sorption und Desorption	1							
1_7_7	Komplexbildner	1							
1_7_8	Kolloidaler Radionuklidtransport	1							
1_7_9	Auflösung	1							
1_8_1	Chemische Umwandlung	2							
1_8_3	Mikrobielle Wechselwirkungen	1							
2_1_6	Änderungen des Spannungsfeldes	1	x						
2_1_10	Generierung von Auflockerungszonen (EDZ)	1							
2_3_8	Wiederauflösung	1							

Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponenten

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Wirtsgestein					
		14	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen SF_4	Integritätserhalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion SF_8	Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts SF_9	Rückhaltung gasförmiger Radionuklide SF_10	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption SF_19
		WG					
2_5_2	Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen	1	x	x	x		
2_5_3	Standorterkundung	1	x	x	x		
3_1_1	Dehydratation von Salzmineralien	1					
3_1_2	Unterschiedliches elastisches Anspreverhalten	1	x		x		
3_1_4	Induzierte hydrologische Änderungen	1			x		
3_1_5	Nicht-elastisches Anspreverhalten	1	x		x		
3_2_4	Auslaugung	2		x			
3_2_6	Mikrobielle Effekte	2				x	
3_2_7	Redox-Potenzial, pH	1					x
3_2_10	Gasfluss, Gasfreisetzung, Verbleib von Gasen	1					x
3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	1					x
3_2_13	Speziation der Radionuklide	1					x
3_3_2	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	1	x		x		
3_3_5	Bruch- / Rissbildung	1	x		x		
3_3_6	Wiederanpassung des Wirtsgesteins an Trennfugen	1	x		x		
3_3_7	Vorliegen und Verbindung von Resthohlräumen	1	x		x		
3_3_8	Volumenänderung	3	x				
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	2			x		
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	2	x		x		



Anhang 8: Zuordnung der FEP zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen der Systemkomponenten

GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	Geologische Umgebung						
		15	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen SF_4	Integritätsverhalt: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion SF_8	Begrenzung des Radionuklidtransports durch geringe Permeabilität SF_12	Temperaturbegrenzung /Integritätsverhalt: Ableitung der Zerfallswärme SF_16	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Kolloidfiltration SF_18	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption SF_19
2_1_10	Generierung von Auflockerungszonen (EDZ)	1		x				
2_3_8	Wiederaufstättigung	1		x				
2_5_2	Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen	1		x				
2_5_3	Standorterkundung	1		x				
3_1_2	Unterschiedliches elastisches Anspreverhalten	1		x				
3_1_4	Induzierte hydrologische Änderungen	1			x			
3_1_5	Nicht-elastisches Anspreverhalten	1		x				
3_2_6	Mikrobielle Effekte	2						x
3_2_11	Lösung von Gasen, flüchtigen Spezies und Entgasung	1			x			
3_2_13	Speziation der Radionuklide	1						x
3_3_2	Änderungen des in situ Spannungsfeldes	2	x					
3_4_1	Wärmeproduktion, Temperaturentwicklung	3				x		
3_4_7	Thermo-Mechanische-Effekte	3				x		

**Verteiler:**

## Druckexemplare

BfS	M. Beushausen		3
GRS	Abteilung 7030	fap	1
GRS	Autoren	beu, bgu	2
GRS	Bibliothek	hog	1
<b>Gesamtsauflage</b>		<b>gedruckte Exemplare</b>	<b>7</b>

## Bericht im pdf-Format

BfS	M. Beushausen		
BfS	Dr. Volland		
GRS	Geschäftsführung	hah, stj	
GRS	Bereichsleiter	paa, lim, rot, prg, erv, zir	
GRS	Projektcontrolling	brs	
GRS	Projektleitung	beu	
GRS	Autoren	bgu	
GRS	Abteilung 7030	fap	
GRS	Bibliothek	hog	
GRS	TECDO	nit	
GRS	GRS-Portal	ham	
GRS	Elektron. ZA	(eZA) vet	

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**  
Telefon +49 221 2068-0  
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

**[www.grs.de](http://www.grs.de)**