

**Bericht  
für  
das Vorhaben**

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

**ISIBEL**

**AP 3: FEP-Generierung und Szenarientwicklung**

Stand November 2006

(letzte redaktionelle Bearbeitung 20. Februar 2008)

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>	
1	Einleitung	3
2	FEP-Generierung	3
2.1	Abgrenzung FEP-Liste / ergänzende Dokumente	3
2.2	Umsetzung von Anforderungen an die standortspezifische FEP-Liste	4
2.2.1	Transparenz und Nachvollziehbarkeit	4
2.2.2	Vollständigkeit	4
2.3	Ergebnisse der FEP-Generierung	5
2.3.1	Screening des NEA-FEP-Katalogs	5
2.3.2	Definition standortspezifischer FEP	7
2.3.3	Zeitliche und räumliche Gliederung der FEP	7
3	Szenarientwicklung	9
3.1	Anwendung der Szenario-Technik	9
3.2	Szenarientwicklung nach dem Bottom-Up Ansatz	10
4	Ergebnis: Szenario Wirtsgestein 0 – 10.000 Jahre	12
4.1	Initialzustand	12
4.2	Prozesse	13
4.2.1	Mechanische Prozesse	13
4.2.2	Thermische Prozesse	14
4.2.3	Hydraulische Prozesse	14
4.2.4	Chemische Prozesse	15
4.3	Variationen	15
5	Zusammenfassung	16
6	Literatur	17
Anhang 1		18
Anhang 2		29
Anhang 3:		36
Anhang 4:		39
Anhang 5:		50

## **1 Einleitung**

Für eine sicherheitliche Bewertung eines HAW-Endlagers muss geprüft werden, ob und ggf. in welchen Umfang die möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagers zur Freisetzung von Radionukliden führen können. Dazu muss zunächst bestimmt werden, wie sich die Barrierewirksamkeit der geologischen und technischen Barrieren entwickeln wird. Die möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagers werden als Szenarien beschrieben.

Ein Szenario besteht aus einem Satz von Prozessen und Ereignissen, die in der Zukunft stattfinden und den Einschluss bzw. die Freisetzung von Radionukliden bewirken oder beeinflussen können sowie den geologischen und technischen Merkmalen des Standortes und des Abfalls. Diese Merkmale, Ereignisse und Prozesse (Features, Events, Processes – FEP) werden in einer FEP-Liste zusammengestellt.

In den mit diesem Bericht vorgestellten Arbeiten wird ein Ansatz verfolgt, bei dem zunächst die einzelnen FEP definiert werden. Aus den möglichen Kombinationen der relevanten FEP ergeben sich anschließend zwangsläufig die zu betrachtenden Szenarien. Dieser Ansatz wird als Bottom-Up-Ansatz bezeichnet. Im Gegensatz dazu werden beim hier nicht verfolgten Top-Down-Ansatz zunächst Szenarien definiert und anschließend die dafür relevanten FEP abgeleitet.

Die in diesem Bericht vorgestellte Vorgehensweise zur Szenarientwicklung greift auf Arbeitsergebnisse zurück, die bis Oktober 2006 erstellt wurden. Nach der Berichtserstellung gemachte Fortschritte, insbesondere in der Zusammenstellung und Beschreibung von FEP, sind hier nicht berücksichtigt, insofern stellt der Bericht einen Zwischenstand dar.

Die folgenden Kapitel schildern die verfolgte Vorgehensweise bei der Zusammenstellung der FEP-Liste für einen Referenzstandort für ein HAW-Endlager im Wirtsgestein Salz und beschreiben exemplarisch dabei ermittelte standortspezifische FEP und die sich daraus ergebenden Szenarien.

## **2 FEP-Generierung**

### **2.1 Abgrenzung FEP-Liste / ergänzende Dokumente**

In der mit diesem Bericht auszugsweise vorgelegten standortspezifischen FEP-Liste werden insbesondere die zukünftig möglichen Ereignisse und Prozesse beschrieben, während die Merkmale, die den Ist-Zustand zum Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagers

charakterisieren, in separaten Beschreibungen der Geologie am Standort, des Endlagerbergwerks und des Abfalls dargelegt werden. Grundlage für die Szenarientwicklung sind damit hier neben der FEP-Liste die genannten Standort-, Endlagerbergwerks- und Abfallbeschreibungen. Lediglich für diejenigen Merkmale, über deren Ausprägung zum Zeitpunkt des Endlagerverschließens heute Unsicherheiten bestehen, wird eine explizite Nennung in der FEP-Liste als vorteilhaft angesehen.

## **2.2 Umsetzung von Anforderungen an die standortspezifische FEP-Liste**

### **2.2.1 Transparenz und Nachvollziehbarkeit**

Ein Vorteil des verfolgten Bottom-Up Ansatzes wird darin gesehen, dass über die Berücksichtigung oder Zurückstellung einzelner Szenarien nicht unmittelbar aufgrund von Expertenmeinungen entschieden wird, sondern, anders als im hier nicht verfolgten Top-Down Ansatz, bei dem ausgehend von unterstellten Szenarien die relevanten FEP abgeleitet werden, die Ableitung der Szenarien methodisch festgelegt ist. So wird dem Eindruck der Subjektivität vorgebeugt. Expertenmeinungen spielen jedoch auch in dem verfolgten Bottom-Up Ansatz eine wichtige Rolle, nämlich bereits bei den FEP-Definitionen und den Entscheidungen über die Berücksichtigung oder Zurückstellung der einzelnen FEP in der standortspezifischen FEP-Liste. Diese Entscheidungen müssen transparent und nachvollziehbar sein. Deshalb werden die Begründungen für die Irrelevanz der zurückgestellten FEP dokumentiert. Die Relevanz der berücksichtigten FEP ergibt sich unmittelbar aus der jeweiligen FEP-Beschreibung, in der die Auswirkungen des FEP genannt werden.

### **2.2.2 Vollständigkeit**

Voraussetzung dafür, dass die für den Standort mit dem Bottom-Up-Ansatz identifizierten Szenarien für alle Sachverhalte abdeckend sind, ist die Vollständigkeit der zugrunde gelegten FEP. Um die relevanten FEP vollständig zu erfassen, wurde auf den NEA-FEP-Katalog (NEA/OECD 2000) als Grundlage zurückgegriffen und ergänzt durch standortspezifische Besonderheiten eine für den Referenzstandort gültige FEP-Liste erstellt.

Der NEA-FEP-Katalog wurde von einer Arbeitsgruppe innerhalb der OECD/NEA mit dem Ziel erarbeitet, alle in einer Sicherheitsbewertung zu berücksichtigenden FEP zusammen zu stellen und so als Maßstab für eine umfassende Identifizierung von FEP im Rahmen einer Sicherheitsbewertung von Endlagerstandorten dienen zu können. Dazu wurden die in bestehenden Sicherheitsanalysen von Endlagerprojekten in verschiedenen Ländern verwendeten FEP-Listen analysiert und die darin enthaltenen FEP im NEA-FEP-Katalog zusammengestellt. Die Verwendung des NEA-FEP-Katalogs als Datengrundlage bietet

daher die Gewähr, dass keines der in anderen Sicherheitsanalysen als relevant erkannten FEP unberücksichtigt bleibt.

## **2.3 Ergebnisse der FEP-Generierung**

### **2.3.1 Screening des NEA-FEP-Katalogs**

Um die standortspezifische FEP-Liste zu generieren, wurde jedes einzelne FEP des NEA-FEP-Katalogs aufgrund der standort- und wirtsgesteinsspezifischen Gegebenheiten des Referenzstandortes konkretisiert und dabei erforderlichenfalls in mehrere Standort-FEP aufgeteilt.

Im NEA-FEP-Katalog sind die FEP verschiedenen Kategorien zugeordnet. In der Kategorie „Bewertungsbasis“ sind 10 FEP aufgeführt, mit denen die Randbedingungen für die Sicherheitsbewertung beschrieben werden. Als Randbedingungen für die als Grundlage dieses Berichts zusammengestellte standortspezifische FEP-Liste werden folgende Festlegungen getroffen:

NEA-FEP 0.01 Impacts of concern:

Keine allgemeine Einschränkung

NEA-FEP 0.02 Timescales of concern:

1 Million Jahre

NEA-FEP 0.03 Spatial domain of concern:

Gesamter von Wechselwirkungen mit dem Endlager betroffener Bereich ohne Einschränkung

NEA-FEP 0.04 Repository assumptions:

Gemäß Endlagerbeschreibung

NEA-FEP 0.05 Future human action assumptions:

Keine Berücksichtigung von menschlichem Eindringen, sonstige Aktivitäten der Gesellschaft werden entsprechend der heutigen Situation unterstellt

NEA-FEP 0.06 Future human behaviour (target group) assumptions

wie vor

NEA-FEP 0.07 Dose response assumptions

Zunächst nur Berücksichtigung von FEP vor dem Eintritt von Radionukliden in die Biosphäre

NEA-FEP 0.08 Aims of the assessment

Gemäß Projektbeschreibung ISIBEL

NEA-FEP 0.09 Regulatory requirements and exclusions

Keine gesonderten Einschränkungen aufgrund gesetzlicher oder sonstiger regulatorischer Vorgaben

NEA-FEP 0.10 Model and data issues

Datengrundlagen sind das geologische Standortmodell (Keller [2005]) und das DBE Endlagerkonzept (DBE [1997]).

Neben der übergeordneten Kategorie „Bewertungsbasis“ gibt es für konkrete FEP die drei Kategorien

1. „External Factors“ für z.B. geologische und klimatische FEP,
2. „Disposal System Domain: Environmental Factors“ für z.B. FEP im Zusammenhang mit der Abfallverpackung, sowie
3. „Disposal System Domain: Radionuclide/Contaminant Factors“ für z.B. FEP im Zusammenhang mit dem Verhalten von Radionukliden in der Biosphäre und der Exposition.

In der Kategorie „Disposal System Domain: Radionuclide/Contaminant Factors“ des NEA-FEP-Katalogs werden FEP genannt, die mit den Eigenschaften der Radionuklide, der Art ihrer Freisetzung oder Rückhaltung im Nahfeld sowie der Exposition eines Individuums in der Biosphäre in Zusammenhang stehen. Da diese FEP keine Auswirkung auf die geologischen und geotechnischen Prozesse im Endlagersystem haben, können sie für die Betrachtung geologischer Szenarien zunächst zurückgestellt werden.

Auf Grundlage der in den verbleibenden Kategorien „External Factors“ und „Disposal System Domain: Environmental Factors“ des NEA-FEP-Katalogs aufgeführten FEP wurden für den Referenzstandort die FEP der Tabelle 1 (Anhang 1) benannt.

Die in dieser Tabelle genannten FEP können während Überarbeitungen von Definitionen der einzelnen FEP sowie im Zuge der Kombination zu Szenarien Änderungen erfahren. So ist zu erwarten, dass neue FEP hinzukommen, einzelne FEP zusammengefasst werden können, während für andere FEP eine Aufteilung in mehrere FEP sinnvoll sein kann. Um eindeutige Namensgebungen zu erreichen kann zudem eine Änderung der Bezeichnungen erforderlich sein.

Bei der Zusammenstellung der im Anhang 1 wiedergegebenen FEP-Liste für den Referenzstandort wurde für die berücksichtigten Kategorien „External Factors“ und „Disposal System Domain: Environmental Factors“ eine umfassende Identifizierung aller relevanten FEP angestrebt. Ob diese angestrebte Vollständigkeit erreicht wurde, lässt sich nicht allein aufgrund der FEP-Bezeichnungen, sondern nur aufgrund der FEP-Beschreibungen überprüfen. Beispielsweise fehlt in der Auflistung neben dem dort enthaltenen FEP Vulkanismus ein FEP Plutonismus. Das standortspezifische FEP Vulkanismus ist jedoch so definiert, dass damit auch der Prozess Plutonismus mit abgehandelt ist und somit keine Auslassung vorliegt.

### **2.3.2 Definition standortspezifischer FEP**

Für die Beschreibung der einzelnen FEP wurde eine Struktur gewählt, in der die für die weitere Verwendung der FEP in der Szenarientwicklung erforderlichen Informationen sowie die für die Gewährleistung der Verfahrenstransparenz erforderlichen Angaben in übersichtlicher Weise angeordnet sind.

Zunächst wird in einer Kurzbeschreibung der durch das FEP repräsentierte Sachverhalt allgemeingültig angegeben. Beispielsweise wird das FEP Erosion als Abtragungs- und Verlagerungsprozess von Boden- und Gesteinsmaterial an der Erdoberfläche beschrieben. Es folgt eine Darstellung der Sachlage am Referenzstandort, in der z.B. für das FEP Erosion dargelegt wird, wie groß die Erosionsleistung am Referenzstandort im Betrachtungszeitraum sein wird. Im nächsten Abschnitt werden die sicherheitsrelevanten Auswirkungen des FEP genannt, also Auswirkungen auf die Integrität von Barrieren oder auf die Ausbreitung von Radionukliden bzw. auf andere integritäts- oder ausbreitungsrelevante FEP. Weitere Bestandteile der FEP-Beschreibung sind Angaben zu einer etwaigen zeitlichen Beschränkung der Wirksamkeit des FEP sowie, um die Zuordnung des FEP zum NEA-Katalog zu ermöglichen, der Zahlencode des zugehörigen NEA-FEP. Zur weiteren Handhabung des FEP wird vermerkt, ob das FEP für die Szenarientwicklung berücksichtigt werden muss oder unberücksichtigt bleibt. Unberücksichtigt bleiben solche FEP, die am Referenzstandort aufgrund der standortspezifischen oder endlagerspezifischen Gegebenheiten keine Auswirkungen auf die Integrität von Barrieren oder auf die Ausbreitung von Radionukliden bzw. auf andere integritäts- oder ausbreitungsrelevante FEP haben. Zu solchen spezifischen Gegebenheiten gehören z.B. ein am Referenzstandort unwahrscheinlicher Vulkanismus oder eine im Wirtsgestein Salz nicht geplante Bentonitverfüllung der Einlagerungsörter. Die hierfür relevanten FEP müssen für den Referenzstandort nicht berücksichtigt werden.

Als Beispiele für standortspezifische FEP für den Referenzstandort im Wirtsgestein Salz werden im Anhang 2 und 3 die FEP „Kaltzeit mit vollständiger Inlandvereisung“ und „Lösungsvorkommen im Wirtsgestein“ mit dem Bearbeitungsstand Oktober 2006 vorgestellt.

### **2.3.3 Zeitliche und räumliche Gliederung der FEP**

Bei der Szenarientwicklung nach der Szenario-Technik (s. Anhang 4) müssen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen berücksichtigten FEP festgestellt werden. Die Anzahl der möglichen Kombinationen von FEP, für die diese Wechselwirkungen festgestellt werden müssen, wächst überproportional mit der Anzahl der zu berücksichtigenden FEP: Während aus zehn FEP 45 verschiedene Kombinationen gebildet werden können, sind bei hundert FEP bereits fast 5.000 Kombinationen möglich. Wenn aus Gründen der Nachvollziehbarkeit angestrebt wird, für alle Verfahrensschritte die Begründungen an-

zugeben, müssten folglich bei Vorliegen von hundert FEP die Begründungen zur Einschätzung der Wechselwirkungen für fast 5.000 FEP-Kombinationen dokumentiert werden. Darunter würde letztlich auch die Transparenz des Verfahrens leiden, in dem Fall nicht wegen fehlender Informationen, sondern aufgrund von zu vielen Informationen, in denen die wichtigen Angaben untergehen.

Aus Gründen der Praktikabilität und der Nachvollziehbarkeit ist es daher zweckmäßig, FEP, die aufgrund räumlicher oder zeitlicher Trennung nicht miteinander wechselwirken können, in unterschiedlichen Szenarientwicklungen zu verwenden. Dies kann u. a. dadurch geschehen, dass verschiedene Systeme definiert werden, für die die Szenarientwicklungen getrennt erfolgen. Für den Referenzstandort wurden vier Systeme abgegrenzt: Nahfeld, Wirtsgestein, Strecken und Schächte sowie Deck- und Nebengebirge. Damit wird auch vermieden, dass unsinnige Wechselwirkungen von z. B. Kaltzeit mit Matrixkorrosion beurteilt werden müssen.

### **2.3.3.1 Einteilung von Betrachtungszeiträumen**

Für eine zeitliche Gliederung bieten sich als Kriterien der Wärmeeintrag vom Abfall in das Gebirge sowie das Auftreten von Kaltzeiten an, da sich zu diesen beiden Kriterien die zukünftigen Verläufe gut prognostizieren lassen. Mit diesen Kriterien werden die Betrachtungszeiträume wie folgt eingeteilt:

#### Zeitraum 1: 0 bis 10.000 Jahre

Thermische Auswirkung des Abfalls, Warmzeit

#### Zeitraum 2: 10.000 bis 50.000 Jahre

Keine thermische Auswirkung des Abfalls, Warmzeit

#### Zeitraum 3: 50.000 bis 200.000 Jahre

Keine thermische Auswirkung des Abfalls, Kaltzeit; nach 100.000 Jahren kontinuierlicher Permafrost, nach ca. 150.000 Jahren Eisbedeckung möglich

#### Zeitraum 4: 200.000 bis 1.000.000 Jahre

Multiple von Zeitraum 2 und 3

### **2.3.3.2 Festlegung räumlicher Systeme**

Als Gesichtspunkte für eine räumliche Gliederung werden vor allem die differenzierten Wirksamkeiten der FEP im Raum berücksichtigt. Folgende Systeme wurden definiert:

### System Nahfeld

Das System Nahfeld umfasst die eingelagerten Abfälle und deren Verpackung, die Einlagerungshohlräume in der unmittelbaren Umgebung der eingelagerten Gebinde sowie die um die Einlagerungshohlräume vorhandene Auflockerungszone.

### System Strecken und Schächte

Das System Strecken und Schächte umfasst die Strecken und sonstigen bergmännischen Hohlräume außerhalb der Einlagerungshohlräume und die Schächte, jeweils nebst den sie umgebenden Auflockerungszonen.

### System Wirtsgestein

Das System Wirtsgestein umfasst am Referenzstandort alle Salinargesteine im Salzstock, also insbesondere das die Einlagerungsbereiche aufnehmende Hauptsalz z2HS sowie die Salinargesteine der Leine-Serie z3. Dem System Wirtsgestein nicht zugerechnet werden die darin angelegten bergmännischen Hohlräume sowie deren Auflockerungszonen. Das Hutgestein wird ebenfalls nicht dem Wirtsgestein zugeordnet.

### System Deck- und Nebengebirge

Das System Deck- und Nebengebirge umfasst die den Salzstock umgebenden und überlagernden Sedimente und das Hutgestein. Das Hutgestein und die überlagernden Sedimente sind hydraulisch miteinander verbunden. Daher wird das Hutgestein als Teil des Systems Deck- und Nebengebirge angesehen.

## **3 Szenarientwicklung**

### **3.1 Anwendung der Szenario-Technik**

Zur Ableitung von Szenarien aus der standortspezifischen FEP-Liste wurde die in Keller (2003a) und Keller (2003b) beschriebene Szenario-Technik angewendet (s. Anhang 4). Dabei wurde zunächst das System Wirtsgestein bearbeitet. Die Beschränkung auf die Betrachtung des Systems Wirtsgestein führt dazu, dass viele der ca. 150 für den Referenzstandort vorläufig definierten FEP unberücksichtigt bleiben können, weil ihre direkte Wirksamkeit auf andere Systeme beschränkt ist, z.B. Nahfeldprozesse. Auf der Grundlage der vorläufigen standortspezifischen FEP-Liste wurden die folgenden FEP als relevant für das System Wirtsgestein eingestuft:

- *Erosion*
- *Diapirismus*
- *Diffusion*
- *Gasdruck*
- *Gaseindringdruck*

- *Imprägnierung*
- *Kaltzeit mit Permafrost*
- *Kaltzeit mit Permafrost und Inlandeis in randlicher Lage*
- *Kaltzeit mit vollständiger Inlandvereisung*
- *Konvergenz*
- *Natürliche Gas- u. Lösungsvorkommen (NGL)*
- *Rissbildung*
- *Subrosion*
- *Sedimentation*
- *Thermische und mechanische Wechselwirkungen*
- *Transgression/Regression*
- *Verschluss von Kluftsystemen*
- *Wärmeausdehnung*
- *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen*
- *Zerfallsenergie (-wärme)*

Die Kombination dieser FEP zu Szenarien unter Anwendung der Szenario-Technik wird im Anhang 4 erläutert. Das mit der Szenario-Technik erzielte Ergebnis zeigt, dass ihre Anwendbarkeit Einschränkungen unterworfen ist. Das Verfahren der Szenario-Technik bietet sich an für die Einschätzung der Wechselwirkungen von FEP, die nur qualitativ voneinander abhängig sind. Im hier betrachteten System Wirtsgestein wirken viele Prozesse jedoch nicht nur qualitativ, sondern quantitativ nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten aufeinander. Für die Anwendbarkeit der Szenario-Technik zur Definition von Szenarien müsste daher die zugrunde gelegte FEP-Liste dahingehend angepasst werden, dass Prozesse, die nach bekannten Gesetzmäßigkeiten ihre Ursache in anderen FEP haben, wie z.B. die aus Kriechprozessen resultierende Konvergenz, nicht als FEP definiert werden.

### **3.2 Szenarientwicklung nach dem Bottom-Up Ansatz**

Die bei der Erarbeitung der standortspezifischen FEP-Liste verfolgte Vorgehensweise, bei der auch voneinander abhängige Prozesse als FEP beschrieben werden, führt bei der Szenariengenerierung nach dem Bottom-Up Ansatz auf Szenarien, in denen sämtliche dieser Prozesse berücksichtigt werden müssen.

Im Interesse einer verbesserten Übersichtlichkeit wurde versucht, die Anzahl der für das System Wirtsgestein als relevant erkannten FEP weiter zu reduzieren. Dazu wurden die Abhängigkeiten der FEP grafisch dargestellt um festzustellen, ob die isolierte Betrachtung einzelner FEP oder FEP-Gruppen möglich ist. Die Identifizierung besonders wenig vernetzter FEP durch die grafische Darstellung ist nicht möglich (s. Anhang 5). Es wurde

vielmehr festgestellt, dass alle FEP wegen ihres Einflusses auf oder ihrer Beeinflussung durch die thermomechanischen und hydraulischen Bedingungen vielfältig miteinander vernetzt sind und eine isolierte Betrachtung daher nicht zulässig ist.

Eine weitere Möglichkeit, die Anzahl der gleichzeitig zu berücksichtigenden FEP zu reduzieren, besteht darin, neben der Betrachtung jeweils nur eines räumlichen Systems zusätzlich die im Kapitel 2.3.3.1 erläuterte zeitliche Trennung von FEP zu nutzen. Die Beschränkung auf die Betrachtung des Wirtsgesteins in den ersten 10.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers führt beispielsweise dazu, dass Klima-FEP nicht berücksichtigt werden müssen, da sich die nächste Kaltzeit erst nach mehr als 50.000 Jahren entwickeln wird. Ebenso können die geologischen FEP *Erosion*, *Subrosion*, *Sedimentation* und *Diapirismus* zurückgestellt werden, da sie aufgrund der am Referenzstandort geringen Raten nur über längere Zeiträume zu merklichen Veränderungen des Endlagersystems führen können. Das FEP *Transgression/Regression* wird nicht zurückgestellt, um einen eventuellen Anstieg des Meeresspiegels durch anthropogene klimawirksame Veränderungen der Atmosphäre abzudecken. Für das System Wirtsgestein in den ersten 10.000 Jahren nach Verschluss des Endlagers sind daher nur die folgenden FEP relevant:

- *Diffusion*
- *Gasdruck*
- *Gaseindringdruck*
- *Imprägnierung*
- *Konvergenz*
- *Natürliche Gas- u. Lösungsvorkommen (NGL)*
- *Rissbildung*
- *Thermische und mechanische Wechselwirkungen*
- *Transgression/Regression*
- *Verschluss von Kluftsystemen*
- *Wärmeausdehnung*
- *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen*
- *Zerfallsenergie (-wärme).*

Diese Aufstellung unterscheidet sich von der Zusammenstellung relevanter FEP bei der Anwendung der Szenario-Technik in Anhang 4. Dazu ist anzumerken, dass die Zurückstellung einzelner FEP bei der Szenarientwicklung nach dem Bottom-Up Ansatz weniger dringlich ist als bei der Anwendung der Szenario-Technik. Bei letzterer steigt die Anzahl der zu bewertenden und zu dokumentierenden Ausprägungskonsistenzen (s. Anlage 4) mit der Anzahl der zu berücksichtigenden FEP überproportional an, während bei der Szenarientwicklung nach dem Bottom-Up Ansatz kein überproportionaler Anstieg des Bearbeitungsaufwandes auftritt. Deshalb können je nach angewandter Methode die Gründe für die Zurückstellung einzelner FEP unterschiedliches Gewicht haben, und es ist

für die probeweise Anwendung der Methoden im Rahmen der hier dokumentierten Arbeiten legitim, mit unterschiedlichen Mengen von relevanten FEP zu arbeiten.

Die Berücksichtigung der geologischen FEP *Erosion*, *Subrosion*, *Sedimentation* und *Diapirismus* wäre in Form einer sehr geringfügigen Variation des Überlagerungsdruckes in den ersten 10.000 Jahren mit unerheblichem Aufwand möglich. Die Belassung in der Liste der zu berücksichtigenden FEP wäre daher als praktikable Option ebenso wie die tatsächlich vorgenommene Zurückstellung in Frage gekommen. Tatsächlich erfolgte die Zurückstellung nicht aus Gründen der Praktikabilität, sondern um die zeitlich veränderliche Bedeutung der einzelnen FEP angemessen zu berücksichtigen. Die geologischen FEP sind erst zu späteren Zeiten entscheidend für die Entwicklung des Endlagersystems, in denen der ursprüngliche Zustand der geologischen Barrieren weitgehend oder vollständig wieder hergestellt ist und die Existenz des Endlagers für die weitere Entwicklung der geologischen Barrieren unbedeutend ist, während in den ersten 10.000 Jahren die Auswirkungen der geologischen FEP *Erosion*, *Subrosion*, *Sedimentation* und *Diapirismus* auf das Endlagersystem unbedeutend sind.

#### **4 Ergebnis: Szenario Wirtsgestein 0 – 10.000 Jahre**

Das Szenario umfasst die Zeit vom Beginn der Nachbetriebsphase, an dem das Endlager verfüllt und verschlossen ist, bis zur Wiederherstellung der natürlichen Temperaturverhältnisse nach ca. 10.000 Jahren. Es ist vorteilhaft, die im Betrachtungszeitraum wirksamen thermomechanischen Prozesse bereits beginnend mit dem unverritzten Salzstock zu betrachten, da die Initialzustände für diesen Zeitpunkt einfach zu beschreiben sind und die Prozesse, die den Zustand des unverritzten Salzstocks verändert haben, auch die weitere Entwicklung des Endlagersystems während der ersten 10.000 Jahre bestimmen. Die Initialzustände sind entsprechend den Erkundungsergebnissen wie folgt definiert:

##### **4.1 Initialzustand**

- Mechanischer Initialzustand  
Der Spannungszustand im Inneren des Salzstocks ist vor der Anlage der Grubenbaue wegen der Fließfähigkeit des Steinsalzes und der Tatsache, dass das Salzfließen bei beliebig kleinen Deviatorspannungen einsetzt, isostatisch. Durch die Überlagerung mit Gesteinen der mittleren Dichte  $2,2 \text{ Mg/m}^3$  beträgt die Spannung im Niveau der Einlagerungssohle ca. 19 MPa (Heusermann et al. 2003).
- Thermischer Initialzustand

Die Gebirgstemperatur steigt mit der Teufe. Der thermische Tiefengradient beträgt etwa 3 K/100 m. Im Niveau der Einlagerungssohle beträgt die Gebirgstemperatur vor der Einlagerung 313 K.

- **Hydraulischer Initialzustand**  
Im unverritzten Zustand ist das Wirtsgestein im Bereich des Hauptsalzes z2HS außerhalb von Fluidvorkommen frei von vernetzten, durchströmbaren Porenräumen. Fluidvorkommen liegen entsprechend der Standortbeschreibung als KW-Nester im Hauptsalz oder als Lösungs- und Gasvorkommen außerhalb des z2HS vor.
- **Chemischer Initialzustand**  
Das Wirtsgestein ist jeweils lokal im Gleichgewicht mit darin enthaltenen Fluiden. Die langfristige Subrosionsrate am Salzspiegel beträgt 0,01 bis 0,02 mm/Jahr.

## 4.2 Prozesse

Der Initialzustand wird durch mechanische, thermische, hydraulische oder chemische Prozesse verändert.

### 4.2.1 Mechanische Prozesse

Durch die Auffahrung von Hohlräumen wird das isostatische Spannungsfeld verändert. Dabei treten im Nahbereich um die Hohlräume Spannungen auf, die eine Deformation des Gebirges bewirken und die durch Kriechvorgänge abgebaut werden (*FEP Konvergenz, FEP Thermische und mechanische Wechselwirkungen*). Bei Überschreiten der rheologischen Dilatanzgrenze können Wegsamkeiten entstehen (*FEP Rissbildung*).

Erforderliche Modelle:

- elastische Verformung
- Salzkriechen
- dilatante Formänderung
- Bruch.

Randbedingungen für mechanische Prozesse

- Grenze System Wirtsgestein – System Deckgebirge  
Änderung des Überlagerungsdruckes um  $< 1$  MPa aus *FEP Transgression/Regression*, sofern anthropogen verursachte Klimaänderungen zu betrachten

- sind (keine weitere Änderung des Überlagerungsdruckes aus den FEP *Diapirismus, Erosion, Sedimentation*)
- Grenze System Wirtsgestein – Systeme Strecken/Schächte und Nahfeld  
Stützdruck durch Versatz und Porendruck (*FEP Gasdruck, FEP Konvergenz*)

#### 4.2.2 Thermische Prozesse

Die Erwärmung des Gebirges durch den Abfall (*FEP Zerfallsenergie (-wärme)*) bewirkt die Expansion des Gebirges bzw. bei behinderter Dehnung die Zunahme der Druckspannungen (*FEP Wärmeausdehnung*).

Erforderliche Modelle:

- thermische Expansion, Wärmeleitung, Wärmekapazität
- elastische Verformung, Salzkriechen

Randbedingungen für thermische Prozesse

- Grenze System Wirtsgestein – System Deckgebirge  
Keine Änderung der Temperatur von Übertage durch Kaltzeit-FEP
- Grenze System Wirtsgestein – System Nahfeld  
Wärmeeintrag aus *FEP Zerfallsenergie(-wärme)*

#### 4.2.3 Hydraulische Prozesse

Bei Überschreiten der Dilatanzgrenze können Wegsamkeiten entstehen (*FEP Rissbildung*). Wegsamkeiten können durch Kristallisation und Salzkriechen verheilen (*FEP Verschluss von Kluftsystemen*). In bestimmten Bereichen des Salzstocks können Fluide gespeichert sein (*FEP Natürliche Gas- und Lösungsvorkommen*). Fluide, die mit hohen Drücken anstehen, können ohne Rissbildung diffus in das Wirtsgestein eindringen (*FEP Imprägnierung*). Die thermische Ausdehnung von makroskopischen Lösungsvorkommen aufgrund des Wärmeeintrags aus dem Abfall kann zur Entstehung von Wegsamkeiten oder zur Ausbreitung der Fluide im Wirtsgestein durch diffuses Imprägnieren führen (*FEP Rissbildung, FEP Imprägnierung*). Die Integrität des Wirtsgesteins kann im Bereich von Erkundungsbohrungen beeinträchtigt sein (*FEP Erkundungsbohrungen*).

Erforderliche Modelle:

- kompressible hydraulische Strömung, 2-Phasenfluss
- Schädigung, Verheilung (z.B. RV-Konzept)
- Verteilung von natürlichen Gas- und Lösungsvorkommen

#### Randbedingungen für hydraulische Prozesse

- Grenze System Wirtsgestein – System Deckgebirge  
Änderung des hydraulischen Drucks  $< 1 \text{ MPa}$  (*FEP Transgression/Regression*)
- Grenze System Wirtsgestein – Systeme Strecken/Schächte und Nahfeld  
Porendruck im Versatz aus *FEP Gasdruck* und *FEP Gaseindringdruck*

#### 4.2.4 Chemische Prozesse

Die Subrosionsrate am Salzspiegel kann sich aufgrund der Temperaturerhöhung verändern (*FEP Subrosion*). Die Auswirkungen sind aber gering. Wenn sich durch die Temperaturerhöhung die durchschnittliche Subrosionsrate von 0,02 mm/Jahr um den unwahrscheinlichen Wert einer Zehnerpotenz erhöht, werden nur ca. 2 m am Salzspiegel im Zeitraum von 10.000 Jahren zusätzlich abgelautet. Das *FEP Subrosion* wurde deshalb zurück gestellt. Weitere Lösungsprozesse finden in der planmäßigen Entwicklung nicht statt, da untersättigte Lösungen in nennenswertem Umfang nicht vorhanden sind.

Erforderliche Modelle:

- Löslichkeit (nur für nicht planmäßige Entwicklungen)

#### Randbedingungen für chemische Prozesse

- Grenze System Wirtsgestein – System Deckgebirge  
Keine Änderung der hydraulischen Bedingungen im Deckgebirge
- Grenze System Wirtsgestein – Systeme Strecken/Schächte und Nahfeld  
ggf. Lösungszuführung

#### 4.3 Variationen

Die Prozesse laufen entsprechend der dafür bekannten und in den konzeptuellen Modellen abzubildenden Gesetzmäßigkeiten ab. Variationen des Szenarios ergeben sich

- parameterbedingt durch Variation der Parameter in den konzeptuellen Modellen, z.B. im Kriechgesetz,
- vorgehensbedingt durch Variation der Annahmen für Randbedingungen aus anderen Systemen, sofern die entsprechenden Ergebnisse aus den Szenarienanalysen für die anderen Systeme noch nicht vorliegen und deshalb beispielsweise der zeitliche Verlauf des Gasdruckes im Versatzporenraum noch nicht bekannt ist sowie
- FEP-bedingt durch unterschiedliche Annahmen für
  - die Verteilung von natürlichen Gas- und Lösungsvorkommen,
  - die hydraulischen Eigenschaften von Erkundungsbohrungen,

- die Genauigkeit von Erkundungsmethoden.

Abdeckend für die FEP-bedingten Variationen aufgrund unterschiedlicher Annahmen über die Verteilung von natürlichen Gas- und Lösungsvorkommen ist die Annahme eines Fluidvorkommens mit einem Fluidinhalt von 10.000 m<sup>3</sup> im Bereich des dem Einlagerungsbereich nächstgelegenen Übergangs z2/z3.

Abdeckend für die FEP-bedingten Variationen der hydraulischen Eigenschaften von Erkundungsbohrungen sind die Annahmen, dass diese Bohrungen keine Durchlässigkeit besitzen bzw. dass sie eine sehr hohe Durchlässigkeit (10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>) besitzen.

Abdeckend für die FEP-bedingten Variationen aufgrund der Genauigkeit von Erkundungsmethoden ist die Annahme, dass der Abstand des Einlagerungsbereichs zum Übergang z2/z3 nur einen noch festzulegenden Prozentsatz, z.B. 80% des im geologischen Lagerstättenmodell ausgewiesenen Abstandes beträgt.

Diese Angaben zu den in abdeckenden Szenarien anzusetzenden Merkmalen müssen noch durch Zusammenstellungen der den Angaben zugrunde liegenden Erkenntnisse begründet und ggf. angepasst werden.

## 5 Zusammenfassung

Für ein HAW-Endlager an einem Referenzstandort im Wirtsgestein Salz wurde eine standortspezifische FEP-Liste (FEP – Features, Events, Processes) in Grundzügen erstellt. Dabei wurden das Nahfeld, die Strecken und Schächte, das Wirtsgestein sowie das Deck- und Nebengebirge separat betrachtet. Der zeitliche Verlauf der zukünftigen Entwicklung wurde gemäß charakteristischer Veränderungen der Wärmeleistung des Abfalls sowie der Abfolge von Kalt- und Warmzeiten in Abschnitte unterteilt. Aus der FEP-Liste (Bearbeitungsstand Oktober 2006) wurden beispielhaft Szenarien abgeleitet als Kombinationen von Merkmalen sowie zukünftig stattfindenden Prozessen und Ereignissen, die den Einschluss bzw. die Freisetzung von Radionukliden bewirken oder beeinflussen können. Als formalisiertes Vorgehen für die Szenarientwicklung nach dem Bottom-Up Ansatz wurde die Szenario-Technik angewendet. Es zeigte sich, dass die Szenario-Technik nicht für die Szenarientwicklung geeignet ist, wenn die in der zugrunde liegenden FEP-Liste beschriebenen Prozesse nicht nur qualitativ, sondern quantitativ nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten aufeinander wirken.

Das beispielhaft für das Wirtsgestein abgeleitete Szenario für den Zeitraum 0 bis 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers besteht aus einer Zusammenstellung der mechani-

schen, thermischen, hydraulischen und chemischen Prozesse, die die Barriereigenschaften des Wirtsgesteins verändern können.

In den nächsten Bearbeitungsschritten der Sicherheitsanalyse müssen die sich aus den Szenarien ergebenden Konsequenzen für den Einschluss bzw. die Freisetzung von Radionukliden ermittelt werden.

## 6 Literatur

- /2-1/ NEA/OECD (2000): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Vers. 1.2.-- OECD/NEA Publ., Radioactive Waste Management: 88 S., 4 Fig., 4 Tab., App. A-D; Paris - ISBN 92-64-18514-3.
- /2-2/ KELLER, S. (2005): Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz -- BGR, unveröffentl. Ber.; Hannover
- /2-3/ DBE (1997): Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“. Unveröff. DBE-Bericht, Peine
- /3-1/ KELLER, S. (2003a): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). Bewertung von ZEP (Zustände, Ereignisse, Prozesse). 2. Zwischenbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 22 S., 4 Abb., 1 Tab., 1 Anh.; Hannover.
- /3-2/ KELLER, S. (2003b): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). Generierung von Szenarien mit dem Programm "Szenario.Plus". 3. Zwischenbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber., 0123978: 35 S., 2 Abb., 1 Tab., 3 Anh.; Hannover.
- /4-1/ HEUSERMANN, S., EICKEMEIER, R., SPRADO, K.-H., HOPPE, F.-J., KUNZ, H. & KÜCHEMANN, W. (2003): Projekt Gorleben, Gebirgsspannungsuntersuchungen im Erkundungsbereich EB1, Abschlussbericht. -- BGR, unveröffentl. Ber.; Hannover

## Anhang 1

Tabelle 1: FEP des NEA-Katalogs und für den Referenzstandort definierte FEP (Bearbeitungsstand Oktober 2006)

NEA-FEP		standortspezifische FEP	
1	External Factors		
1.1	Repository Issues		
1.1.01	Site Investigation		
		1.1.01.01	Standorterkundung
1.1.02	Excavation/construction		
		1.1.02.01	Grubengebäude
1.1.03	Emplacement of wastes and backfilling		
		1.1.03.01	Mechanische und chemische Stabilität der Verpackung
		1.1.03.02	Hinterfüllungsmaterial/Versatz
1.1.04	Closure and repository sealing		
		1.1.04.01	Mangelhafter Verschluss von Schächten
		1.1.04.02	Mangelhafter Verschluss von Einlagerungsbereichen
1.1.05	Records and markers, repository		
		1.1.05.01	Kenntniserhalt
1.1.06	Waste allocation		
		1.1.06.01	Einlagerungsort bzgl. Geologie
		1.1.06.02	Einlagerungsgeometrie und zeitliche Abfolge von Auffahrung und Einlagerung
		1.1.06.03	Thermische und mechanische Wechselwirkungen
		1.1.06.04	Hebung der Erdoberfläche durch thermische Ausdehnung
		1.1.06.05	Erwärmung der Erdoberfläche
1.1.07	Repository design		
		1.1.07.01	Überlagerung der Nahfeldwirkungen einzelner Einlagerungshohl-

			räume
1.1.08	Quality control		
		1.1.08.01	Qualitätssicherung
1.1.09	Schedule and planning		
		1.1.09.01	Zeitlicher Ablauf
1.1.10	Administrative control, repository site		
		1.1.10.01	Behördliche Überwachung
1.1.11	Monitoring of repository		
		1.1.11.01	Begleitende Messungen
1.1.12	Accidents and unplanned events		
		1.1.12.01	Schachtunfälle
		1.1.12.02	Kokillensticking
1.1.13	Retrievability		
		1.1.13.01	Rückholbarkeit
1.2	Geological processes and effects		
1.2.01	Tectonic movements and orogeny		
		1.2.01.01	Hebung der Erdkruste (Epirogenese)
		1.2.01.02	Senkung der Erdkruste (Epirogenese)
		1.2.01.03	Orogenese
		1.2.01.04	Grabenbildung (engl. Rifting), Taphrogenese
		1.2.01.05	Neotektonik
		1.2.01.06	Lokale Differentialbewegungen
1.2.02	Deformation, elastic, plastic, plastic or brittle		
		1.2.02.01	Deformation (Verformung) im Deck- und Nebengebirge
		1.2.02.02	Krustendeformation
1.2.03	Seismicity		
		1.2.03.01	Erdbeben
1.2.04	Volcanic and magmatic acti-		

	vity		
		1.2.04.01	Vulkanismus
1.2.05	Metamorphism		
		1.2.05.01	Metamorphose (Gesteinsmeta- morphose)
1.2.06	Hydrothermal activity		
		1.2.06.01	Hydrothermale Aktivität
1.2.07	Erosion and sedimentation		
		1.2.07.01	Erosion (flächenhaft, mechanisch)
		1.2.07.02	Sedimentation
1.2.08	Diagenesis		
		1.2.08.01	Diagenese
1.2.09	Salt diapirism and dissolution		
		1.2.09.01	Diapirismus
		1.2.09.02	Salzauflösung
1.2.10	Hydrological/hydrogeological response to geological changes		
		1.2.10.01	Einfluss geologischer Veränderungen auf die Hydrogeologie
1.3	Climatic processes and effects		
1.3.01	Climate change, global		
		1.3.01.01	Feuchtwarme Klimaverhältnisse
1.3.02	Climate change, regional and local		
		1.3.02.01	Regionale Klimaänderung
1.3.03.	Sea level change		
		1.3.03.01	Meeresspiegelschwankung
1.3.04	Periglacial effects		
		1.3.04.01	Kaltzeit mit Permafrost
1.3.05	Glacial and ice sheet effects, local		
		1.3.05.01	Kaltzeit mit Permafrost und Inland- eis in randlicher Lage
		1.3.05.02	Kaltzeit mit vollständiger Inland-

			vereisung
1.3.06	Warm climate effects (tropical and desert)		
		1.3.06.01	Warmaride Klimaverhältnisse
1.3.07	Hydrological/hydrogeological response to climate changes		
		1.3.07.01	Hydrogeologische Veränderungen aufgrund Klimawandel
1.3.08	Ecological response to climate changes		
		1.3.08.01	Pflanzen und Tierwelt unter verändertem Klima
1.3.09	Human response to climate changes		
		1.3.09.01	Der Mensch bei verändertem Klima
1.4	Future human actions		
1.4.01	Human influences on climate		
		1.4.01.01	Menschlicher Einfluss auf das Klima
1.4.02	Motivation and knowledge issues (inadvertent/deliberate human actions)		
		1.4.02.01	Motivation und Kenntnisstand
1.4.03	Un-intrusive site investigation		
		1.4.03.01	Zukünftige zerstörungsfreie Erkundung
1.4.04	Drilling activities (human intrusion)		
		1.4.04.01	Bohraktivitäten
1.4.05	Mining and other underground activities (human intrusion)		
		1.4.05.01	Bergbau und andere Untergrundaktivitäten
1.4.06	Surface environment, human activities		
		1.4.06.01	Menschliche Aktivitäten an der

			Erdoberfläche
1.4.07	Water management (wells, reservoirs, dams)		
		1.4.07.01	Wasserwirtschaft
1.4.08	Social and institutional developments		
		1.4.08.01	Gesellschaftliche Entwicklung
1.4.09	Technological developments		
		1.4.09.01	Technologische Entwicklungen
1.4.10	Remedial actions		
		1.4.10.01	Sanierungsarbeiten am Endlager
1.4.11	Explosions and crashes		
		1.4.11.01	Explosionen und Unfälle
1.5	Other		
1.5.01	Meteorite impact		
		1.5.01.01	Meteoriteneinschlag
1.5.02	Species evolution		
		1.5.02.01	Artenevolution
1.5.03	Miscellaneous and FEPs of uncertain relevance		
		1.5.03.01	Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen
		1.5.03.02	Radionuklidtransport durch Selbstorganisation chaotischer Systeme
2	Disposal System domain: Environmental factors		
2.1	Wastes and engineered features		
2.1.01	Inventory, radionuclide and other material		
		2.1.01.01	Radioaktives Inventar
2.1.02	Waste form materials and characteristics		
		2.1.02.01	Abfallmatrix
2.1.03	Container materials and characteristics		
		2.1.03.01	Abfallbehälter

2.1.04	Buffer/backfill materials and characteristics		
		2.1.04.01	Feuchteintrag in Einlagerungsbereiche durch feuchten Versatz aufgrund oberirdischer Zwischenlagerung
		2.1.04.02	Freisetzung von Kristallwasser aus Salzmineralien im Nahfeld
		2.1.04.03	Betriebsbedingter Feuchteintrag in zu versetzende Einlagerungsbereiche
		2.1.04.04	Chemische Verhältnisse im Versatz
2.1.05	Seals, cavern/tunnel/shaft		
		2.1.05.01	Alteration von Querschnittsabdichtungen
		2.1.05.02	Versagen des Schachtausbaus
		2.1.05.03	Versagen aller Querschnittsabdichtungen – Durchgängiger Transportpfad vom Endlager zur Biosphäre
2.1.06	Other engineered features materials and characteristics		
		2.1.06.01	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften
		2.1.06.02	Erkundungsbohrungen außerhalb des Einlagerungsbereichs
		2.1.06.03	Erkundungssohle
2.1.07	Mechanical processes and conditions (in waste and EBS)		
		2.1.07.01	Rissbildung
		2.1.07.02	Konvergenz
		2.1.07.03	Lagestabilität Schachtfundament
		2.1.07.04	Salzlösungsauspressung aus Hohlräumen
		2.1.07.05	Mechanische Wirkung von Gasdruck
		2.1.07.06	Hebung/Senkung des Deckgebirges
		2.1.07.07	Versatzkompaktion

		2.1.07.08	Lagestabilität der Abfallbehälter
		2.1.07.09	Volumenzunahme des Eisens (Stahls) durch Korrosion
2.1.08	Hydraulic/hydrogeological processes and conditions (in wastes and EBS)		
		2.1.08.01	Quellen des Betonits aufgrund Durchfeuchtung
		2.1.08.02	Lösungsvorkommen im Wirtsgestein
		2.1.08.03	Migration von Lösungseinschlüssen im Wärmefeld (Thermomigration)
		2.1.08.04	Bewegung von Salzlösungen in Klüften des Wirtsgesteins
		2.1.08.05	Bewegung von Salzlösungen im Salzgestein
		2.1.08.06	Bildung eines zusammenhängenden Kluftsystems im Salzgestein
		2.1.08.07	Verschluss von Kluftsystemen
		2.1.08.08	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
		2.1.08.09	Diffusion
		2.1.08.10	Lösungen in Behältern
		2.1.08.11	Veränderung des Puffers und des Versatzes durch Lösungen
		2.1.08.12	Verdampfen von Lösungen
		2.1.08.13	Verbesserung der Kriechfähigkeit des Versatzes und des aufgelockerten Salzgesteins
2.1.09	Chemical/geochemical processes and conditions (in wastes and EBS)		
		2.1.09.01	Krustenbildung
		2.1.09.02	Metallkorrosion
		2.1.09.03a	Glasmatrixkorrosion
		2.1.09.03b	Brennelementmatrixkorrosion
		2.1.09.04	Rückreaktion Radiolyseprodukte
		2.1.09.05	Zündfähige Gasgemische

		2.1.09.06	Chemie des Nahfeldes
		2.1.09.07	Galvanische Elemente
2.1.10	Biological/biochemical processes and conditions (in waste and EBS)		
		2.1.10.01	Zersetzung von organischen Bestandteilen mit Bildung von Gasen
2.1.11	Thermal processes and conditions (in waste and EBS)		
		2.1.11.01	Temperaturänderung am Salzspiegel
		2.1.11.02	Zerfallsenergie (Zerfallswärme)
		2.1.11.03	Wärmeausdehnung
		2.1.11.04	Wärmeleitung
		2.1.11.05	Wärmekapazität (Wärmespeicherung)
		2.1.11.06	Chemische Reaktionswärme
		2.1.11.07	Thermische Gasfreisetzung
		2.1.11.08	Temperaturmaximum im Einlagebereich
		2.1.11.09	Gesteinsschmelzung
		2.1.11.10	Thermische Carnallit-Zersetzung
		2.1.11.11	Zugspannungen im Salzspiegelbereich
		2.1.11.12	Spannungsänderungen in Hauptanhydritschollen
2.1.12	Gas sources and effects (in wastes and EBS)		
		2.1.12.01	Korrosionsgas
		2.1.12.02	Gasdruck
		2.1.12.03	Gaseindringdruck
		2.1.12.04	Gasspeicherung
2.1.13	Radiation effects (in wastes and EBS)		
		2.1.13.01	Versprödung durch ionisierende Strahlung
		2.1.13.02	Radiolyse

2.1.14	Nuclear criticality		
		2.1.14.01	Kritikalität (Nachträgliche Anreicherung von spaltfähigem Material im Endlager)
2.2	Geological Environment		
2.2.01	Excavation disturbed zone, host rock	2.2.01.01	Auflockerungszone (ALZ)
		2.2.01.02	Rückbildung/Verheilung der ALZ
2.2.02	Host rock		
		2.2.02.01	Wirtsgestein
2.2.03	Geological units, other		
		2.2.03.01	Andere geologische Einheiten
2.2.04	Discontinuities, large scale (in geosphere)		
		2.2.04.01	Störungszonen
2.2.05	Contaminant transport path characteristics (in geosphere)		
		2.2.05.01	Transportpfade in der Geosphäre für Radionuklide
2.2.06	Mechanical processes and conditions (in geosphere)		
		2.2.06.01	Mechanische Prozesse in der Geosphäre
2.2.07	Hydraulic/hydrogeological processes and conditions (in geosphere)		
		2.2.07.01	Lösungsmigration
2.2.08	Chemical/geochemical processes and conditions (in geosphere)		
		2.2.08.01	Chemische Prozesse in der Geosphäre
2.2.09	Biological/biochemical processes and conditions (in geosphere)		
		2.2.09.01	Biochemische Prozesse in der Geosphäre
2.2.10	Thermal processes and conditions (in geosphere)		

		2.2.10.01	Geothermische Prozesse in der Geosphäre
2.2.11	Gas sources and effects (in geosphere)		
		2.2.11.01	Gasvorkommen
		2.2.11.02	KW-Vorkommen im Nebengebirge
2.2.12	Undetected features (in geosphere)		
		2.2.12.01	Unbekannte Merkmale
2.2.13	Geological resources		
		2.2.13.01	Rohstoffvorkommen
2.3	Surface environment		
2.3.01	Topography and morphology		
		2.3.01.01	Topographie und Morphologie
2.3.02	Soil and sediment		
		2.3.02.01	Boden
2.3.03	Aquifers and water-bearing features, near surface		
		2.3.03.01	Aquifere
2.3.04	Lakes, rivers, streams and springs		
		2.3.04.01	Seen und Flüsse
2.3.05	Coastal features		
		2.3.05.01	Küstenlinien
2.3.06	Marine features		
		2.3.06.01	Maritime Bedingungen
2.3.07	Atmosphere		
		2.3.07.01	Atmosphäre
2.3.08	Vegetation		
		2.3.08.01	Vegetation
2.3.09	Animal populations		
		2.3.09.01	Tiere
2.3.10	Meteorology		
		2.3.10.01	Wetter
2.3.11	Hydrological regime and water balance (near-surface)		

		2.3.11.01	Hydrogeologisches System
2.3.12	Erosion and deposition		
		2.3.12.01	Oberflächenerosion und Ablagerung
2.3.13	Ecological/biological microbial systems		
		2.3.13.01	Biosphäre

## Anhang 2

### **FEP „Kaltzeit mit vollständiger Inlandvereisung“ (Bearbeitungsstand Oktober 2006)**

#### Definition/Kurzbeschreibung

Bei einer zukünftigen deutlichen Verringerung der Jahresmitteltemperaturen kommt es zur Ausbildung einer neuen Kaltzeit, in der die Landoberfläche durch eine mächtige Vereisung bedeckt werden kann. Die Inlandvereisung wird wie während der vergangenen Kaltzeiten von Skandinavien ausgehen und nach Süden vorrücken. Während der Elster-Kaltzeit erreichte der maximale aus dem Norden kommende Gletschervorstoß die deutschen Mittelgebirge und erstreckte sich in Mittel- und Ostdeutschland bis in die Regionen um Erfurt und Dresden. Im westlichen Teil Norddeutschlands lagen die äußersten Eisrandlagen im Düsseldorfer und Dortmunder Raum. Eine ähnliche Ausdehnung hatte das Inlandeis der Saale-Kaltzeit. Dagegen bedeckte die maximale Ausdehnung der letzten Kaltzeit (Weichsel) mit ihrer südlichsten Eisrandlage nur die Gebiete nördlich der Elbe.

Die Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises wird im skandinavischen Raum, im Bereich der Eisscheide, mit 2000 m bis 3000 m angegeben; in den Randbereichen wie z. B. im nordwestdeutschen Raum dürfte sie nur noch einige hundert Meter betragen haben. Für den Bereich der Rehburger Endmoräne werden 300 m – 350 m und für den Außenrand des saalezeitlichen Inlandeises am Südrand der westfälischen Bucht Mächtigkeiten von 130 m – 170 m bzw. für den Oberweserraum von etwa 200 m genannt (Skupin et al. 2003).

Aus Skupin et al. (2003: 72ff.) ist zu entnehmen, dass "nach theoretischen Berechnungen der Fließgeschwindigkeiten in Eisschilden für den zentralen Teil einer fließenden Eismasse Werte von 15 m – 40 m pro Jahr, für die Randbereiche Geschwindigkeiten von über 100 m - 600 m pro Jahr anzunehmen sind. Für das Inlandeis der letzten Kaltzeit (Weichsel-Zeit) werden im norddeutschen Vereisungsgebiet Fließgeschwindigkeiten zwischen 75 m und 150 m pro Jahr angegeben. Die Randbereiche des Inlandeises der Saale-Kaltzeit weisen eine mittlere Vorstoßgeschwindigkeit von etwa 200 m pro Jahr auf. Diese höhere Geschwindigkeit lässt sich aus der im Vergleich zum Weichsel-Eis größeren Mächtigkeit der saalezeitlichen Eisdecke ableiten. Mit der Annäherung des Eises an die Mittelgebirge haben sich zwischen dem Eisrand und den Höhenzügen ausgedehnte Stauseen gebildet. Auch nördlich des Wiehengebirges wird ein derartiger Stausee vermutet, in dem sich das Schmelzwasser des Inlandeises und der Zustrom der von Süden kommenden Flüsse sammelten. Beim Überfahren dieser Stauseen hat die Fließgeschwindigkeit des Eises sehr wahrscheinlich stark zugenommen. Vergleichbare Verhältnisse lagen im Bereich südlich des Wiehen- und Wesergebirges vor, in dem sich der so genannte Rinterner Eisstausee gebildet hatte. Dort dürfte die Fließgeschwindigkeit wegen des Auftriebs der Eismasse und des Aufschwimmens der randlichen Zonen des Eises maximale Werte von 500 m - 600 m pro Jahr erreicht haben. Das Wasser, das die Eismasse in einem gewissen Grad vom Untergrund entkoppelte, wirkte sozusagen als Schmiermittel. Es setzte die Reibungs- und Scherwiderstände herab und führte damit zu einer deutlich schnelleren

Bewegung des Eises. Bei einer Fließgeschwindigkeit von 500 m pro Jahr hätte der Portagletscher auf seinem Vorstoß nach Osten - das Wesertal aufwärts bis in die Gegend von Hameln - etwa 60 Jahre benötigt. Dieser Wert stimmt in der Größenordnung gut mit der vermuteten Dauer der ersten Phase des Rinterner Eisstausees überein".

Die Dauer eines Kaltzeit (Glazial) – Warmzeit (Interglazial) – Zyklus beträgt im Mittel- und Oberpleistozän etwa 100 000 Jahre. Im Unterpleistozän scheint ein kürzerer Zyklus von ca. 40 000 Jahre vorzuherrschen. Zum Höhepunkt der Weichsel-Kaltzeit (20 000-18 000 Jahre v. h.) betrug die Absenkung der Mitteltemperaturen in Mitteleuropa je nach Position für den Januar -18 bis -24°C, für den August -10 bis -12°C und für das Jahresmittel -10 bis -15°C [Lexikon der Geowissenschaften. Edu-Insti (2000)].

Der Beginn einer Kaltzeit ist aber nicht mit dem sofortigen Erreichen tiefster Temperaturen gleichzusetzen. Das Maximum der Abkühlung tritt, wie am Beispiel der Weichsel-Kaltzeit ersichtlich, erst mit einer gewissen Verzögerung am Ende auf, wobei es im Verlaufe der Kaltzeit insbesondere während der frühen Phase zu einem Kalt-Warm-Wechsel von Stadialen und Interstadialen kommt (Behre et al. 1986), die eine Dauer von ca. 10 000 Jahren umfassen. Anhand der Sauerstoffisotopen-Kurve des GRIPP-Eiskerns, die einen Wechsel im globalen Eisvolumen reflektiert, ist ersichtlich, dass diese Phasen von Klimaschwankungen unterschiedlicher Intensität modifiziert sind. Die Dansgaard-Oeschger-Zyklen im Zeitrahmen eines Milleniums z. B. begründen sich auf kurzfristige Temperaturerhöhungen von 5 °C bis 15 °C innerhalb weniger Zehnerjahre (SKB 2001: 68ff.; Fig. A1-1).

Die extrem kalten Stadiale der Kaltzeiten waren ausgesprochen trockene Zeitabschnitte. In der Weichsel-Kaltzeit fielen in Mitteleuropa ca. 500 mm Niederschlag weniger als heute. In den kaltzeitlichen Interstadialen herrschten ausgeglichene klimatische Verhältnisse. Es konnte sich eine Tundravegetation, in ausgeprägteren Interstadialen sogar ein Birken-Kiefern-Wald entwickeln.

Als Ursachen für Kaltzeiten kommen terrestrische und extraterrestrische Faktoren in Frage. Es werden als auslösende Faktoren diskutiert:

- Änderung der primären Sonnenstrahlung und der interstellaren Materie,
- Drift von Kontinenten,
- Gebirgsbildung,
- Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre,
- Vulkanismus und
- Änderung der Erdbahnelemente.

Die einzelnen Faktoren jeder für sich erscheinen zu schwach für eine drastische Klimaänderung. Man geht daher von einer Koppelung von verschiedenen Faktoren und einer Verstärkung der Effekte durch Rückkoppelung aus, v. a. über die Albedo. Die primäre Sonnenstrahlung ist der bei weitem kräftigste Parameter für das Klima der Erde. Geringe Änderungen können drastische Klimawechsel erzeugen. Kurzperiodische Änderungen wie der Sonnenfleckzyklus (z. B. Maunder-Minimum, "Kleine Eiszeit" des 17. u. 18. Jahrhunderts) werden als klimawirksam eingeschätzt. Die über Millionen von Jahren verlaufende Drift von Kontinenten in Polbereiche - heute die Antarktis - scheint ein wesentlicher Faktor

für die Entstehung von Eiszeitaltern zu sein. Auch die Entstehung von durch Kontinente abgeschlossenen Meeresbereichen in Polnähe - heute Arktis - ist förderlich für die Akkumulation von Schnee und Eis, ebenso wie die Heraushebung in große Höhen durch Gebirgsbildung, z. B. Himalaya mit Tibet.

Für die Steuerung der Zyklizität innerhalb der Eiszeitalter, der wiederkehrende Wechsel von Kaltzeit zu Warmzeit, werden heute allgemein die Erdbahnparameter, Exzentrizität der Erdbahn mit Perioden von 413 000 und 95 000 Jahren, die Schiefe der Ekliptik mit einer Periode von 41.000 Jahren und die Präzessionsbewegung der Erdachse mit Perioden von 23.000 und 19.000 Jahren verantwortlich gemacht. Letztere führt zum Umlauf des Perihel. Die aus diesen Elementen berechnete Kurve der Schwankungen der Stärke der Sonneneinstrahlung wird als Milanković-Kurve bezeichnet. Weil die Perioden 100 000 und 41 000 Jahre auch in dem Kaltzeit-Warmzeit-Zyklus dominieren, wird ein enger Zusammenhang angenommen. Die Zusammensetzung der Atmosphäre ist ebenfalls ein wesentlicher Klimafaktor. Die Konzentration v. a. von Wasserdampf, gefolgt von Kohlendioxid und Ozon, hat Einfluss auf die Temperatur der Erdoberfläche. Bei den vulkanischen Gasen ist neben CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O die schwefelige Säure zu nennen. Ihr Einfluss auf das Klima ist erwiesen, scheint aber nur kurzfristig und räumlich relativ begrenzt zu sein [Lexikon der Geowissenschaften. Edu-Insti (2000)].

#### Sachlage am Referenzstandort

Am Referenzstandort sind die Sedimente der letzten drei großen Kaltzeiten (Elster, Saale und Weichsel) mit den dazwischen liegenden Ablagerungen der Warmzeiten (Holstein, Eem) mit großen Mächtigkeiten vertreten (Köthe et al. 2003; Zirngast et al. 2003; verkürzte Zusammenfassung s. geol. Referenzmodell von Keller 2005). Ältere kalt- und warmzeitliche Sedimente sind nur in Relikten erhalten.

Elsterzeitliche Rinnenbildungen liegen z. T. auf dem Salzstock auf. Für die prognostizierte nächste Kaltzeit vom Typ Weichsel ist allerdings mit keiner Rinnenbildung zu rechnen, da der Referenzstandort durch das Eis nicht überfahren wird.

Der Tiefgang von Lagerungsstörungen, die durch das vorrückende Inlandeis verursacht wurden, erreichte während der vergangenen Kaltzeiten im Gorlebener Gebiet (Referenzstandort) ca. 100 bis 150 m.

Ein erhöhter Überlagerungsdruck durch das Inlandeis vermag den Aufstieg eines Salzstocks zu initiieren. Die Aufstiegstendenzen dürften aber nur kurze Zeit Bestand und nur geringe Auswirkungen haben, da eine Inlandvereisung, in geologischen Zeitdimensionen betrachtet, nur eine äußerst kurze Erscheinung darstellt. Wären z. B. die durch die Saale-Kaltzeit hervorgerufenen Auswirkungen größer, so müsste eine deutliche Verstellung der präelster- und elsterzeitlichen Schichten in Salzstockrandposition zu beobachten sein. Dies ist aber nicht nachzuweisen. Es wird daher davon ausgegangen, dass eine erneute Inlandvereisung zeitlich nicht genügend lange wirksam ist, um einen weiteren Salzaufstieg mit den damit verbundenen deutlichen Strukturveränderungen auszulösen.

### Auswirkungen

Durch die Eisüberfahung werden oberflächennahe Schichten erodiert (Exaration) und/oder eistektonisch gestört. Beide Möglichkeiten beinhalten eine Destruktion bestehender Lagerungsverhältnisse, die zu einer Zunahme oder Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit führt. Auswirkungen der Eisüberfahung bis in Tiefen von 200 bis 300 m sind in Norddeutschland von verschiedenen Stellen bekannt, die eine Überdeckung mit Inlandeis erfuhren (Eissmann 1987; Hannemann 1995). Neben einer Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit der über dem Salzstock befindlichen Sedimentschichten kann auch die Beeinflussung der Schachtbauwerke im obersten Bereich durch zukünftige Inlandeisüberschiebung nicht ausgeschlossen werden.

Aus der Elster-Kaltzeit und in geringem Maße auch aus der Saale-Kaltzeit ist die Bildung von Rinnensystemen bekannt (in: Benda 1995). Ihre Genese wird mit unter hohem Druck stehenden, eisrandnahen Schmelzwässern in Zusammenhang gebracht (Piotrowski 1994), die an der Basis des Inlandeises relativ kurzfristig abfließen und eine hohe Erosionsleistung aufwiesen. An einigen Stellen der Norddeutschen Tiefebene reichte die Erosion bis in mehrere hundert Meter Tiefe. Prinzipiell ist die Entstehung solcher Rinnen auch während einer erneuten Eiszeit denkbar. Dies würde in Abhängigkeit vom Ausmaß der Rinnenbildung lokal eine Umgestaltung der Sedimente des Deckgebirges bedeuten, wobei heute verbreitete tonige, gering wasserleitende Schichten (z. B. Lauenburger Ton, Holstein-Ton) durch sandige Sedimente ersetzt werden könnten. Im Extremfall wird durch die Rinnenbildung auch die Erosion von Hut- und Salzgestein möglich sein. Eine andere Erklärung der Genese wäre die Rinnenbildung durch die oben erwähnte Exaration. Mit einer Rinnenbildung ist ein Austausch von Ablaugungswässern durch Frischwasser über einem Salzstock möglich. Sind die Ablaugungswässer bereits mit Radionukliden belastet, so erfolgt eine schnelle Verdünnung der Radionuklidkonzentrationen.

In Abhängigkeit von den Eismächtigkeiten werden durch das Eisgewicht die Sedimentschichten deformiert und die Erdkruste sinkt ein (Menzies 1995: 318). Bei einer vermuteten Eismächtigkeit von bis zu 3 000 m wurde die Kruste Skandinaviens um ca. 750 bis 1 000 m deformiert. Der Wiederaufstieg der Kruste, sofern eine elastische Reaktion stattfindet, muss um diesen Betrag erfolgen. Im Vorland einer Inlandvereisung findet dagegen zunächst eine geringe Aufwärts- und danach eine Absenkbewegung statt (Ahlbom et al. 1991: Fig. 6). Im Zuge dieser Auf- und Abbewegungen können an unter Spannung stehenden Schwächezonen Erdbeben ausgelöst werden.

Die Morphologie erfährt eine vollständige Umgestaltung. Neben den im Gletschervorland äußerst dynamisch ablaufenden Sedimentations- und Erosionsprozessen bewirkt das mit erheblichen Mengen Sedimentfracht beladende, erosiv wirkende Inlandeis, dass die bestehenden Täler zugeschüttet oder die aus Lockermaterialien zusammengesetzten Hügel und Hügelketten eingeebnet werden. Die in den anderen kaltzeitlichen FEPs ("Kaltzeit mit Permafrost", "Kaltzeit mit Permafrost und Inlandeis in randlicher Lage") unterstellte weitere Existenz eines als Vorfluter fungierenden Elbetals ist während einer solchen großflächigen Inlandeisüberdeckung der Landschaft höchst unwahrscheinlich.

Mit fortschreitender Dauer der Inlandvereisung und bei großen Eismächtigkeiten von mehreren hundert Metern erfolgt unterhalb des Eises ein Permafrostrückgang. Die hydraulische Durchlässigkeit der Sedimente ändert sich. Über die Fließrichtungen oder Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers sowie seine Fähigkeit, Salze zu lösen, sind bei einer mächtigen Inlandvereisung keine Aussagen zu machen.

Bei einer erneuten Kaltzeit, die zur Ausbreitung einer Inlandvereisung auf dem europäischen Festland führt, werden große Mengen von Wasser gebunden. Dadurch sinkt der Meeresspiegel in Abhängigkeit vom Ausmaß der Inlandvereisung um mehrere Zehnermeter ab. Entsprechende Erkenntnisse können aus dem Sedimentations-, bzw. Erosionsverlauf früherer Kaltzeiten abgeleitet werden. Durch eine Absenkung des Meeresspiegels wird das Erosionsniveau tiefer gelegt und die Flüsse könnten sich bei großen Reliefunterschieden unter der heutigen Meeresbedeckung tiefer in die Landschaft einschneiden. Solche Bedingungen liegen für den Referenzstandort jedoch nicht vor.

#### Zeitliche Beschränkung des FEP

Ausgehend von der Annahme, dass sich das Muster der Klimavariationen im Quartär für die erste kommende Periode in der Zukunft (in ca.  $10^5$  Jahren) fortsetzen wird, gestatten Klimamodelle eine Prognose für das zukünftige Klima. Die bislang möglichen Rechnungen gehen davon aus, dass mit einer nächsten Kaltzeit vom Typ "Weichsel" gerechnet werden kann (Berger et al. 1995; Boulton et al. 2001; Boulton et al. 1992; Forsström 1999).

Eine Simulation des Eisvolumens auf der Nördlichen Halbkugel zeigt die allmähliche Zunahme des Eises (Loutre 1997 zit. in Gerardi et al. 1999). Danach wird ein erster kleinerer Vorstoß des Inlandeises in der Zeit von etwa 23 ka nach heute erwartet. Weitere folgen nach etwa 65 ka mit  $21 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  und 102 ka nach heute mit  $33,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ . Das glaziale Maximum einer nächsten Kaltzeit soll bei etwa 154 ka nach heute liegen und zwar mit einem totalen Eisvolumen, das mit dem des letzten Maximums der Weichsel-Kaltzeit ( $46,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ ) vergleichbar ist. Zusammenfassende Informationen zur zeitlichen Variabilität der Klimaänderungen liegen zudem von Goodess et al. (1999), IPCC (2001) und NIREX (1997) vor.

#### Handhabung

Nahfeld: Muss berücksichtigt werden für Spannungsverhältnisse unter veränderter Auflast.

Strecken und Schächte: Muss berücksichtigt werden für Spannungsverhältnisse unter veränderter Auflast.

Wirtsgestein: Muss berücksichtigt werden für Spannungsverhältnisse unter veränderter Auflast und veränderte Subrosion.

Deck-/Nebengebirge: Muss berücksichtigt werden für Rechnungen mit Berücksichtigung veränderter Grundwasserverhältnisse.

Zuordnung (NEA-FEP-Nummer / Ref.-Standort-FEP-Nr.)

1.3.05. / 1.3.05.02

Bearbeitungsstand

2006-04-03

Literatur

- AHLBOM, K., ÄJKÄS, T. & ERICSSON, L. O. (1991): SKB/TVO Ice Age Scenario.-- Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, YJT- **91-19**: 27 S., 9 Fig.; Helsinki - ISSN-0359-548X.
- BEHRE, K.-E. & LADE, U. (1986): Eine Folge von Eem und 4 Weichsel-Interstadialen in Oerel/Niedersachsen und ihr Vegetationsverlauf.-- *Eiszeitalter u. Gegenwart*, **36**: 11-36, 12 Abb., 2 Tab., 2 Taf.; Hannover.
- BENDA, L. (Hrsg.) (1995): *Das Quartär Deutschlands*-- 1. Aufl.: 408 S., 95 Abb., 30 Tab.; Berlin (Gebrüder Bornträger) - ISBN 3-443-01031-8.
- BERGER, A. & LOUTRE, M.-F. (1995): The Climate of the next 100,000 Years. (In: BEAUDOIN, B. et al. (Eds.): *Actes du Colloque GEOPROSPECTIVE*, 18-19 april 1994)-- UNESCO: 69-76, 3 Fig.; Paris.
- BOULTON, G. S., GUSTAFSON, G., SCHELKES, K., CASANOVA, J. & MOREN, L. (2001): Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (Pagepa). Final report.-- Office for Official Publications of the European Communities. Nuclear Science and Technology, **EUR 19784 EN**: 147 S., 2 Ann.; Luxemburg.
- BOULTON, G. S. & PAYNE, A. (1992): Reconstructing the past and predicting the future regional components of global change: The case of glaciation in Europe.-- Proc. Workshop WC-1 (Waste Disposal and Geology Scientific Perspectives), 29<sup>th</sup> Int. Geol. Congr.: 51-134, 37 Fig.; Tokyo/Japan.
- EISSMANN, L. (1987): Lagerungsstörungen im Lockergebirge. Exogene und endogene Tektonik im Lockergebirge des nördlichen Mitteleuropa.-- *Geophys. u. Geol., Veröff. der KMU Leipzig*, Bd. **III**, **4**: 7-77; Berlin.
- FORSSTRÖM, L. (1999): Future glaciation in Fennoscandia.-- Posiva OY, POSIVA **99-30**: 31 S., 11 Fig.; Helsinki - ISBN 951-652-085-5.
- GERARDI, J. & WILDENBORG, A. B. F. (1999): Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben.-- BGR, unveröffentl. Ber., **117869**: 144 S., 95 Abb., 20 Tab., 24 Anl.; Hannover.
- GOODESS, C. M., WATKINS, S. J., BURGESS, P. E. & PALUTIKOF, J. P. (1999): Assessing the Long-Term Future Climate of the British Isles in Relation to the Deep Underground Disposal of Radioactive Waste.-- NIREX, Nirex Report **N/010**: 193 S., 41 Fig., 16 Tab., 2 App.; Oxfordshire/U.K.
- HANNEMANN, M. (1995): Intensität und Verbreitung glazigener Lagerungsstörungen im tieferen Quartär und Tertiär.-- *Brandenburgische Geowiss. Beitr.*, **2**: 51-59; Kleinmachnow.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (In: HOUGHTON, J. T. et al. (eds.)-- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): 881 S.; Cambridge/U.K. (Cambridge University Press).
- KELLER, S. (2005): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz. Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz. Beitrag für das Projekt ISIBEL.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 75 S., 8 Abb., 5 Tab.; Hannover.

- KÖTHE, A., ZIRNGAST, M. & ZWIRNER, R. (2003): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung, Teil I: Deckgebirge Geologie. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G3411900000.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 255 S., 43 Abb., 20 Tab.; Hannover.
- Lexikon der Geowissenschaften. Edu-Insti (2000).-- Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 2; Berlin - ISBN 3-8274-0421-5.
- MENZIES, J. (Ed.) (1995): Modern Glacial Environments. Processes, Dynamics and Sediments.-- Glacial Environments, Vol. 1: 621 S.; Oxford/U.K. (Butterworth & Heine-mann).
- NIREX (1997): A Critical Review of the Climate Literature relevant to the Deep Disposal of Radioactive Waste.-- NIREX, Science Report, Nirex Safety Assessment Research Programme **S/97/009**: 294 S., 35 Fig., 3 Tab.; Oxfordshire/U.K.
- PIOTROWSKI, J. A. (1994): Tunnel valley formation in northwestern Germany - Geology, mechanisms of formation, and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley.-- Sediment. Geol., **89**: 107-141, 17 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- SKB (2001): Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel.-- Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), TR- **99-05**: 117 S., App. A-D; Stockholm.
- SKUPIN, K., SPEETZEN, E. & ZANDSTRA, J. G. (2003): Die Eiszeit in Nordost-Westfalen und angrenzenden Gebieten Niedersachsens. Elster- und saalezeitliche Ablagerungen und ihre kristallinen Leitgeschiebegesellschaften.-- Geol. Dienst Nordrhein-Westfalen: 95 S., 15 Abb., 10 Tab., Anh. 1-3; Krefeld.
- ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R., BORNEMANN, O., FLEIG, S., HOFFMANN, N., KÖTHE, A., KRULL, P. & WEISS, W. (2003): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbaue des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 570 S., 42 Abb., 32 Tab., 195 Anl., 1 Anh.; Hannover.

### Anhang 3:

#### **FEP „Lösungsvorkommen im Wirtsgestein“ (Bearbeitungsstand Oktober 2006)**

##### Definition/Kurzbeschreibung

Zutretende Lösungen können als Feuchtstellen, Tropfstellen oder Zulaufstellen angetroffen werden. Die Zuflüsse sind zeitlich nicht immer konstant, sondern können sich verringern, vollständig versiegen oder sich periodisch in ihren Zulaufraten verändern. Sie werden unter dem Begriff Zutrittslösungen zusammengefasst (Schramm 2005). Als Feuchtstelle wird ein Lösungszutritt ohne erkennbare sich frei bewegende Lösung bezeichnet. Gelegentlich kommen in diesem Zusammenhang kleine Stalaktiten von wenigen Zentimetern Länge vor. Als Tropfstellen werden Lösungszutritte definiert, bei denen einzelne Tropfen aus dem Gebirge austreten. Oft kommen an diesen Stellen Stalaktiten und Stalagmiten vor. Als Zulaufstellen werden solche Orte bestimmt, an denen Lösungen mit erhöhten Zuflussraten von unter einem Liter bis mehreren Kubikmetern pro Minute zutreten. Neben den Zutrittslösungen können Lösungen als Standlösungen in Form von Pfützen oder Tümpeln (offene Standlösungen) oder als verdeckte, periodische oder reliktsche Lösungen vorkommen.

Einen weiteren Typ von Lösungsvorkommen stellen Lösungseinschlüsse (Fluid Inclusions) dar. Bei diesen Lösungseinschlüssen handelt es sich um fluide Einschlüsse im Gestein. Die Einschlüsse können intrakristallin oder interkristallin an Korngrenzen vorkommen. Ihr Stoffbestand ist identisch mit den primären Meerwasserrestlösungen oder den sekundär gebildeten metamorphen Lösungen, aus denen sich die Wirtsminerale bildeten.

##### Sachlage am Referenzstandort

Am Referenzstandort wurden mehrfach Lösungsvorkommen angetroffen. Die angetroffenen Lösungsvorkommen sind nicht beliebig im Salzstock verteilt, sondern an bestimmte stratigraphische Horizonte mit einer entsprechenden petrographischen und strukturellen Ausbildung gebunden. Diese Horizonte zeichnen sich dadurch aus, dass ihr sedimentärer oder diagenetisch bedingter Verband trotz der halokinetischen Deformation erhalten geblieben ist (Schramm 2005). Ist der sedimentäre oder diagenetisch bedingte Verband nicht erhalten, z.B. im Knäuelsalz oder allgemein im Hauptsalz, das durch eine extreme Deformation und Homogenisierung gekennzeichnet ist, kommen im Vergleich dazu nur sehr geringe Mengen an Lösungen vor (BORNEMANN et al. 2003b: 83).

Diese Gesetzmäßigkeit erlaubt es bei bekanntem geologischen Bau der Struktur, mögliche Lösungszutritte und ihr Ausmaß bei der Auffahrung vorherzusehen.

Bei der bisherigen Erkundung wurden Lösungszutritte hauptsächlich in den anhydritischen Gesteinen der Leine-Folge (z3) angetroffen, in denen kluft- oder schichtgebundene Speicherräume möglich sind. Die angetroffenen Lösungen stehen unter petrostatischem Druck, was eine Verbindung zu den über dem Salzstock befindlichen Aquiferen ausschließt (vgl. NOWAK et al. 2002: 10ff.). Des Weiteren treten Lösungszutritte an der Grenze zwischen der Staßfurt- und der Leine-Folge (z2/z3) auf.

Das Volumen der bisher angetroffenen Reservoirs beträgt je nach stratigraphischem Horizont, in dem Lösungen und Gase gespeichert sind, zwischen wenigen  $\text{cm}^3$  im Hauptsalz (z2) bis in den Bereich von etwa  $10^3 \text{ m}^3$  im Hauptanhydrit (NOWAK et al. 2002: 62ff.). Die Größe der Zutritte im Hauptanhydrit ist abhängig von der Größe der Hauptanhydritschollen, wobei die Wegsamkeiten innerhalb einer Scholle vollständig vernetzt sein können. Für die Zutritte aus dem Grenzbereich z2/z3 liegt die Gesamtausdehnung hydraulisch kommunizierender Gebirgsbereiche weit über dem 10 m-Bereich, wenn bestimmte strukturelle Voraussetzungen vorliegen. Vom Zechstein 2 aus dem Bereich des Knäuel- bzw. des Hauptsalzes sind Lösungszutritte als Feuchtstellen z. T. ohne erkennbare Zutrittspunkte bekannt. Ihre Mengen liegen in der Größenordnung von wenigen Litern, z. T. waren die Mengen zu gering für eine Bestimmung. Die Ausdehnung der Feuchtstellen im Hauptsalz ist im Bereich von einem bis mehreren Kubikmetern bestimmt worden.

Es treten Lösungen auf, die zunächst ein Gleichgewicht mit den sie einschließenden Salzmineralen nach Ablagerung eingingen. Sie wurden häufig während des Salzaufstiegs mobilisiert und in ihre heutigen Reservoirs transportiert. Dabei wurde die primäre chemische Signatur während des Transportes oder durch ihre neue Speicherumgebung teilweise geändert, indem sich neue Gleichgewichte einstellten. Es entstanden sekundäre chemische Signaturen oder Mischsignaturen. Nur ein kleiner Teil der salzstockinternen Lösungen zeigt keine nachweisbaren Hinweise auf Lösungsmigration.

Die im Erkundungsbergwerk (ohne Schächte), den Tiefbohrungen und den Einschlüssen vorkommenden Lösungen sind überwiegend an Carnallit und oder Sylvit gesättigt. Untergeordnet kommen an Kieserit oder Bischofit gesättigte Lösungen vor. Diese salzstockinternen Lösungen sind einerseits durch Mischung primärer Meerwasserrestlösung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder andererseits aus der Reaktion von Kaliflözgestein mit NaCl-gesättigten Lösungen entstanden. Anhand charakteristischer geochemischer Signaturen konnte nachgewiesen werden, dass die Lösungen im Verlauf der Migration zum Teil mit Schichtsilikaten und oder Karbonaten reagierten.

Alle in den Schächten beprobten Lösungen sind NaCl-gesättigt und meistens infolge bergbaulicher Maßnahmen beeinflusst. Allerdings kommen in den Schächten auch untergeordnet Lösungen vor, die zusätzlich an Sylvit (nur Schacht 2) oder an Carnallit gesättigt sind. Diese salzstockinternen Lösungen können als nicht bergbaulich beeinflusst interpretiert werden. Sie sind durch Migration verändert worden, in deren Folge es zur Mischung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder einer Wechselwirkung mit dem umgebenden Gestein kam.

Von Bedeutung für das chemische Milieu im Salzgestein und damit für eine Ausbreitung von Radionukliden in wässriger Lösung ist weiterhin, dass an unbeeinflussten Proben bislang nur reduzierende Verhältnisse und im Falle der  $\text{MgCl}_2$ -Lösungen niedrige pH-Werte festgestellt wurden.

#### Auswirkungen

Lösungen haben Einfluss auf Korrosionsprozesse und auf Kriecheigenschaften des aufgelockerten Wirtsgesteins und des Versatzes. Es ist möglich, dass Lösungsvorkommen

im Wirtsgestein abhängig von den Temperatur- und Spannungsbedingungen integritätsrelevante Wirkungen entfalten, indem sie bei Druckentlastung im umgebenden Gebirge oder bei Druckerhöhung in der Lösung in das umgebende Salzgestein eindringen. Die Integrität des Wirtsgesteins ist in den Gebirgsbereichen, in denen Lösungen in vernetzten Porenräumen gespeichert sind, nicht gegeben. Die gespeicherten Lösungen können ggf. als Transportmedium für Radionuklide dienen. Der Chemismus der Lösungen ist für das chemische Umfeld von Abschlussbauwerken, Behältern, etc. und die Ausbreitung von Radionukliden in wässriger Lösung Bedeutung. Der Chemismus kann sich unter Temperatureinfluss ändern.

#### Zeitliche Beschränkung des FEP

keine

#### Handhabung

Nahfeld: Muss berücksichtigt werden für Einfluss auf Korrosionsprozesse und auf Kriech-eigenschaften

Strecken und Schächte: Muss berücksichtigt werden für Einfluss auf Porendruck und Verheilungseigenschaften

Wirtsgestein: Muss berücksichtigt werden für Einfluss auf Integrität bei Druckentlastung im umgebenden Gebirge oder bei Druckerhöhung in der Lösung

Deck-/Nebengebirge: Zurückgestellt

#### Zuordnung (NEA-FEP-Nummer / Ref.-Standort-FEP-Nr.)

2.1.08/2.1.08.02

#### Bearbeitungsstand

2006-04-03

#### Literatur

BORNEMANN, O., BEHLAU, J., KELLER, S., MINGERZAHN, G. & SCHRAMM, M. (2003): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Abschlussbericht zum AP G 412110000.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 222 S., 29 Abb., 6 Tab., 4 Anl., 1 Anh.; Hannover.

NOWAK, T., WEBER, J. R. & BORNEMANN, O. (2002): Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 71 S., 44 Abb., 11 Tab.; Hannover.

SCHRAMM, M. (2005): Lösungen im Salzstock Gorleben. Abschlussbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.: i. Vorb., 5 Tab., 10 Anl., 20 Anh.; Hannover.

## Anhang 4:

### Anwendung der Szenario-Technik am Beispiel des Systems Wirtsgestein, Zeitraum 0 – 10.000 Jahre

Grundlage der Szenario-Technik ist das vernetzte Denken in Systemen und einer Auswertung von Expertenbefragungen. Sie wurde ursprünglich für die Analyse von wirtschaftlichen Zusammenhängen wie die Markteinführung bestimmter Waren oder von Strategien entwickelt. Die Methodik wurde auf ihre Brauchbarkeit für eine Szenarientwicklung getestet (KELLER 2002, 2003a, 2003b, 2004, 2006; 2007), die im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen für Endlagerstandorte durchgeführt werden muss. Im Folgenden wird sie auf das System Wirtsgestein angewandt, um das Vorgehen zu erläutern. Der Betrachtungszeitraum umfasst die ersten zehntausend Jahre nach Verschluss eines Endlagers unter den Maßgaben, dass die technischen Barrieren ihre vorgesehene Aufgabe planmäßig erfüllen, dass durch die Konvergenz die aufgefahrenen Hohlräume wieder verschlossen wurden und dass es zu keinem Volllaufen der Einlagerungsbereiche kam. Als Randbedingung ist die Einlagerung von Wärme erzeugenden Abfällen zu berücksichtigen. Als ersten Arbeitsschritt fordert die Methodik die Definition und Festlegung von Rahmenbedingungen des zu betrachtenden Systems (hier: Wirtsgestein: Zeitraum 0 – 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers unter den genannten Maßgaben), danach eine Zusammenstellung der für das bestimmte System relevanten Schlüsselfaktoren (System Wirtsgestein siehe z. B. in Kap. 3.1), die mit dem Begriff FEP (features, events, processes) gleichzusetzen sind. Die relevanten FEP sind zu bewerten und hinsichtlich ihrer Wirkung auf das bestimmte System abzuschätzen. Das Wirken von FEP z. B. im System Wirtsgestein des Referenzstandortes ist beschreibbar, indem das Ausmaß des Einflusses eines FEP auf die anderen bzw. das Ausmaß der Beeinflussbarkeit eines FEP durch die anderen FEP von Experten bewertet wird. Die Bewertung berücksichtigt nur die direkte Wirkung eines FEP auf ein anderes. Das Maß einer Wirkung sind Werte, die methodisch bedingt in den Größen 0, 1, 2, und 3 zur Verfügung stehen. Es steht:

- "0" für "keine oder äußerst schwache Wirkung",
- "1" für "schwache Wirkung",
- "2" für "mittlere Wirkung" und
- "3" für "starke oder sehr starke Wirkung".

Dabei wird die Frage gestellt:

"Wenn sich das FEP Nr. 1 verändert, wie stark/schnell verändert sich durch direkte Einwirkung von Nr. 1 das FEP Nr. 2"; verkürzt: "wie stark beeinflusst FEP Nr. 1 das FEP Nr. 2 (Zeile/Spalte, Abb1.)?"

Als Beispiel werden nachfolgend die Wirkungen des FEP Erosion auf die übrigen für das System des Wirtsgesteins relevanten FEP angegeben und kurz begründet.

#### Wirkung des FEP *Erosion* auf das FEP

- *Diapirismus*: schwache Wirkung: 1  
Begründung: Der Diapirismus wird durch die Mächtigkeit der das Salz überlagernden Sedimentschichten beeinflusst, welche von Erosion und Sedimentation gesteuert wird.
- *Diffusion*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Diffusion findet auf molekularer Ebene statt und wird nicht durch Erosion beeinflusst; Erosion an der Tagesoberfläche ist von Diffusionsvorgängen im Wirtsgestein räumlich getrennt.
- *Gasdruck*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Eine Veränderung des Gasdruckes infolge des Überlagerungsdruckes hätte keinerlei Konsequenz für mechanische Prozesse und ist daher in der hier verwendeten Bedeutung des FEP ohne Relevanz.
- *Gaseindringdruck*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Die Änderung der Porengeometrie durch Veränderung der Auflast ist unter den gegebenen Standortbedingungen irrelevant.
- *Imprägnierung*: keine Wirkung: 0  
Begründung: wie vor.
- *Kaltzeit mit Permafrost*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Erosion hat keinen Einfluss auf das Klima.
- *Kaltzeit mit Permafrost und Inlandeis in randl. Lage*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Erosion hat keinen Einfluss auf das Klima.
- *Kaltzeit mit vollständiger Inlandvereisung*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Erosion hat keinen Einfluss auf das Klima.
- *Konvergenz*: schwache Wirkung: 1  
Begründung: Der Überlagerungsdruck steuert die Konvergenz und wird durch Erosion verändert, in dem sich die Deckgebirgsmächtigkeit ändert.
- *Natürliche Gas- u. Lösungsvorkommen (NGL)*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Die Existenz der Lösungs- und Gasvorkommen ist unabhängig von einer etwaigen zukünftigen Erosion.
- *Rissbildung*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Der durch Erosion veränderbare Überlagerungsdruck beeinflusst den Spannungszustand im Wirtsgestein. Die Erosion kann daher nur indirekt über den Spannungszustand Einfluss auf Rissbildungsprozesse haben.
- *Subrosion*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Änderung der Subrosion kann infolge Reduzierung der Deckgebirgsmächtigkeit und dadurch Änderung der Fließverhältnisse eintreten. Indirekter Ein-

fluss der Erosion auf Subrosion über Fließverhältnisse in einem mächtigkeitsreduzierten Deckgebirge.

- *Sedimentation*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Beide FEP schließen sich gegenseitig aus.
- *Thermische und mechanische Wechselwirkungen*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Erosion hat keinen Einfluss auf die von der Einlagerung bewirkten thermischen und mechanischen Effekte.
- *Transgression/Regression*: keine Wirkung: 0  
Begründung: Wirkung der Erosion zu unbedeutend gegenüber z. B. klimatischen Prozessen oder Hebung/Senkung der Erdoberfläche durch Epirogenese, um Transgression/Regression zu verursachen.
- *Verschluss von Kluftsystemen*: schwache Wirkung: 1  
Spannungsänderungen aufgrund modifizierter Deckgebirgsauflast (Reduktion der Mächtigkeit) können den Verschluss von Kluftsystemen beschleunigen bzw. verlangsamen.
- *Wärmeausdehnung*: keine Wirkung: 0  
Kein direkter Zusammenhang zwischen Erosion und Wärmeausdehnung.
- *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen*: keine Wirkung: 0  
Es besteht kein ursächlicher Zusammenhang zwischen Erosion und der etwaigen Existenz von Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
- *Zerfallsenergie (-wärme)*: keine Wirkung: 0  
Es besteht kein ursächlicher Zusammenhang zwischen Erosion und der Zerfallswärme

In gleicher Weise wurden die Wirkungen für alle im System Wirtsgestein möglichen Kombinationen von je zwei FEP angegeben und begründet. Die Antworten bzw. die Ergebnisse der Abschätzungen sind in Form einer Einflussmatrix (Abb. 1) wiedergegeben. Aus der Matrix lassen sich weitere Kennwerte ableiten:

- RS = Zeilensumme: Aktivsumme,
- SS = Spaltensumme: Passivsumme,
- PR = Produkt ( $\sum$  Zeile  $\cdot$   $\sum$  Spalte): Vernetzung,
- QU = Quotient ( $\sum$  Zeile /  $\sum$  Spalte): Beeinflussbarkeit.

Die Größe der Summe einer Reihe gibt die "Aktivität"/Aktivsumme des FEP innerhalb des Systems an. Je größer die Aktivsumme ausfällt, desto intensiver und wirksamer beeinflusst ein bestimmtes FEP die übrigen (vgl. Abb. 1). Die Summe einer Spalte bestimmt, wie stark ein FEP durch alle anderen FEP beeinflusst wird ("Passivität", Passivsumme). Durch Multiplikation der Zeilen- und zugehörigen Spaltensummen ergibt sich ein Maß für die Einbindung (**Vernetzung**) des FEP in das System bzw. dessen Einfluss auf das Verhalten des Systems mit seinen übrigen FEP. Ist das Produkt groß, so kann es sich um ein

FEP handeln, das entweder äußerst großen Einfluss auf die übrigen hat (sehr große Aktivsumme) und selbst wenig beeinflusst wird (relativ kleine Passivsumme) oder aber um ein FEP, das nicht nur großen Einfluss ausübt (große Aktivsumme), sondern auch selbst stark beeinflusst wird (große Passivsumme). In jedem Fall ist ein FEP bei großem Produkt stark mit dem System vernetzt und somit für das Systemverhalten äußerst bedeutsam.

Durch Division der Zeilen- und Spaltensummen erhält man ein Maß für die Einflüsse aus dem System heraus, die von FEP ausgehen, indem andere FEP eine Veränderung erfahren (**Beeinflussbarkeit**). Ein kleiner Quotient ( $< 1$ ) weist darauf hin, dass die Spaltensumme (Nenner!) als passives Element der FEP-Wirkung gegenüber der Aktivsumme im System groß ist und das FEP einer starken Beeinflussung unterliegt. FEP mit großen Quotienten ( $> 1$ ), die in Verbindung mit hohen Aktivsummen stehen, sind stark vernetzt und wirken beeinflussend auf die anderen FEP im System. Sie werden aus dem System heraus aufgrund ihrer hohen Passivsumme aber auch selbst stark beeinflusst.

Werden in einem xy-Diagramm (Einflussdiagramm: Abb. 2) die Quotienten gegen die Produkte der Werte aus Aktiv- und Passivsumme aufgetragen, so sind mit Hilfe der Grenzen  $[QU] < 1, > 1$  und dem Mittelwert aus allen Produkten  $[ØPR]$  vier Datenfelder abzugrenzen, die das Verhalten der FEP hinsichtlich ihrer Einflussnahme auf das zu betrachtende System und ihrer Beeinflussbarkeit aus dem System heraus festlegen. Die für das Wirken der FEP stehenden Datenpunkte innerhalb der Datenfelder sind als "Aktiv", "reaktiv", "puffernd" und "kritisch" charakterisiert. Die Begriffe wurden der Publikation von GAUSEMEIER, FINK et al. (1996) entlehnt bzw. sind Teil der benutzten Software.

Mit Hilfe des Einflussdiagramms und der Charakterisierung des FEP-Verhaltens ist es möglich, die FEP zu bewerten und die für die geologische Langzeitsicherheit und die Szenarientwicklung bedeutsamen herauszuarbeiten.

Als Ergebnis der FEP-Bewertung ergibt sich, dass im System Wirtsgestein des Referenzstandortes die Konvergenz als kritisches FEP zusammen mit den FEP Therm. u. mech. Wechselwirkungen, Gaseindringdruck und Verschluss von Kluftsystemen eine herausragende Bedeutung durch ihren hohen Vernetzungsgrad und ihre Beeinflussbarkeit aus dem System heraus besitzen (vgl. Datenfeld "kritisch"/"reaktiv", Abb. 2). Auch die FEP Gasdruck, Rissbildung und Nat. Gas- u. Lösungsvorkommen (vgl. Datenfeld "kritisch"/"aktiv", Abb. 2) sind durch ihre starke Vernetzung im System Wirtsgestein als besonders auffällig zu werten und zusammen mit den erstgenannten FEP bevorzugt bei der Generierung von Szenarien zur geologischen Langzeitsicherheitsanalyse zu berücksichtigen.

Die übrigen im Einflussdiagramm genannten FEP werden ebenfalls einer Bewertung für die Szenarientwicklung unterzogen. Dabei sind zeitliche Aspekte (vgl. Vorgabe für das Ergebnisbeispiel im Berichtstext: Szenario Wirtsgestein 0 – 10.000 Jahre) und die besondere Rolle der Wärmentwicklung aus den Abfällen für die ersten 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers zu berücksichtigen.

- Die klimatischen FEP ("Kaltzeit"-FEP) bleiben für den weiteren Verlauf der Arbeiten zur Szenarientwicklung für das konkrete Beispiel zunächst unbe-

rücksichtigt, da solche klimatischen Verhältnisse erst nach 10.000 Jahre zu erwarten sind.

- Ebenfalls bleiben solche FEP unberücksichtigt, die innerhalb der ersten 10.000 Jahre auf das System nur minimale Auswirkungen haben. Dazu gehören die FEP Diapirismus, Erosion, Subrosion und Sedimentation. Zum Beispiel ergeben die aus der geologischen Geschichte des Referenzstandortes abgeleiteten Subrosionsraten von durchschnittlich 0,02 mm/Jahr eine Ablaugung am Salzspiegel von nur 0,2 m.
- Erkundungsbohrungen liegen außerhalb des Einlagerungsbereiches. Ihr Beitrag zu einer möglichen Ausbreitung von Radionukliden aus dem Einlagerungsbereich ist nur indirekt über das vorherige Wirken anderer FEP möglich. Das FEP Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen bleibt daher unberücksichtigt.
- Beim weiteren Vorgehen zur Entwicklung von Szenarien gilt dies für das FEP Transgression/Regression ebenfalls. Eine eventuell auf anthropogene Beeinflussung der bestehenden Klimaverhältnisse zurückzuführende Transgression wird an dieser Stelle nicht als Teil der untersuchten Entwicklung angesehen. Eine Regression hat keine Auswirkungen.
- Das FEP Wärmeausdehnung fällt in das Feld "reaktiv"/"puffernd" und ist damit im System Wirtsgestein wenig wirksam. Wechselwirkungen bestehen zu FEP, die z. T. mit entsprechenden Argumenten als "nicht zu berücksichtigen" angesehen werden (z. B. Erosion, Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen; s. o.). Eine besondere Wirksamkeit ergibt sich lediglich aus der Kombination mit dem FEP Zerfallsenergie (-wärme). Das FEP Wärmeausdehnung wird daher nicht bei der weiteren Entwicklung von Szenarien berücksichtigt.

Die FEP Zerfallsenergie (-wärme) und Diffusion werden aufgrund ihrer direkten Auswirkung auf die Barrierenintegrität bzw. auf eine etwaige Radionuklidmigration berücksichtigt. Ihr Ausmaß an Vernetzung innerhalb des Systems kann allerdings durch die methodisch bedingten Rechenoperationen von Division und Multiplikation mit der Zahl Null in der Einflussmatrix nicht angegeben werden. Die Zahl Null für Aktiv- oder Passivsumme resultiert daher, dass die beiden FEP entweder nur durch andere FEP stark zu beeinflussen (FEP Diffusion mit höchster Passivsumme !) sind, sie üben also selbst keinen Einfluss aus, oder sie sind nur in der Lage andere FEP stark zu beeinflussen und werden dabei selbst von keinem anderen FEP beeinflusst [FEP Zerfallsenergie (-wärme) mit hoher Aktivsumme].

Für die Generierung von Szenarien (Beispiel System Wirtsgestein, Zeitraum von 0 – 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers am Referenzstandort unter den genannten Maßgaben) stehen damit die FEP:

- Diffusion, Gasdruck, Gaseindringdruck, Imprägnierung, Konvergenz, Nat. Gas- u. Lösungsvorkommen, Rissbildung, Thermische und mechanische Wechselwirkungen, Verschluss von Kluftsystemen und Zerfallenergie (-wärme).

zur Verfügung.

Im nächsten Arbeitsschritt sind für die o. g. FEP mögliche Ausprägungen zu definieren. Damit wird sichergestellt, dass z. B. zeitlich bedingte Variationen eines Prozesses erfasst werden, die ansonsten die Definition eines neuen FEP erforderlich machen würden. Weiterhin ist durch Zuordnung von Ausprägungen zu erreichen, dass nur solche in ihren Ausprägungen variable FEP Bestandteil eines Szenarios sein können, die auch zueinander passen bzw. konsistent sind.

Für die berücksichtigten FEP wird qualitativ in einem Wertebereich zwischen 1 und 5 die Konsistenz der Ausprägungen beurteilt (Abb. 3). Beispielsweise erhält das Auftreten von Porenraumdiffusion bei Vorhandensein von natürlichen Gas- und Lösungsvorkommen wegen der damit einhergehenden Existenz von Porenräumen einen höheren Konsistenzwert, während bei Nichtvorhandensein von natürlichen Gas- und Lösungsvorkommen der Konsistenzwert für die Matrixdiffusion höher ist.

Ausgehend von diesen Konsistenzwerten wurde mit der Software SzenarioPlus eine Clusteranalyse durchgeführt und damit eine wahrscheinliche Kombination von FEP-Ausprägungen in einem oder mehreren Rohszenarien ermittelt (Abb. 4). Diese sind anschließend für das jeweils zu betrachtende System detailliert zu diskutieren und als Szenarien qualitativ zu beschreiben.

Zwei Einschränkungen für die Anwendbarkeit des Verfahrens sind zu beachten:

- Ein zeitlicher Verlauf eines FEP (z. B. Kaltzeit mit vollständiger Inlandvereisung) kann mit Hilfe der Ausprägungen (z. B. geringe oder große Eismächtigkeiten) differenziert werden. Wenn aber ein aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten vorbestimmter zeitlicher Verlauf eines FEP abgebildet werden soll, so ist dies durch unterschiedliche Ausprägungen des FEP nicht möglich. Verschiedene Prozesse sind temperaturabhängig, z. B. Diffusionsvorgänge und Salzkriechen (Konvergenz). Um diese Abhängigkeit in der Szenarientwicklung zu berücksichtigen, wurden die Ausprägungen „hoher Wärmeeintrag“ und „geringer Wärmeeintrag“ für das FEP Zerfallsenergie (-wärme) definiert und entsprechende Konsistenzwerte für die temperaturabhängigen Prozesse vergeben. In der Clusteranalyse ist dann zwar die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt, jedoch nicht die Gesetzmäßigkeit des Temperaturverlaufs (ho-

he Temperaturen innerhalb der ersten tausend Jahre, abnehmende bis zum Ausgangszustand nach ca. 10.000 Jahren, so dass mit einem Ergebnis, bei dem die Ausprägung „geringer Wärmeeintrag“ des FEP Zerfallsenergie (-wärme) in einem Rohszenario zustande kommt, letztlich ein für frühe Zeiten unsinniges Szenario zu beschreiben wäre. Im Ergebnisbeispiel (Abb. 4) würde zur Ausprägung "Hoher Wärmeeintrag" [FEP Zerfallsenergie (-wärme)] das Merkmal "Geringe Konvergenz" (FEP Konvergenz) nicht passen, da ein zu postulierendes Szenario die kaum vorstellbare Annahme eines nur geringen Salzkriechens trotz eines hohen Wärmeeintrags enthalten müsste.

- Physikalische Abhängigkeiten der FEP untereinander können durch entsprechende Konsistenzwerte nur ungenügend abgebildet werden. In der Clusteranalyse werden zwar die Abhängigkeiten entsprechend der Konsistenzwerte berücksichtigt, jedoch sind im Ergebnis auch unwahrscheinliche Kombinationen von Ausprägungen möglich, wenn dies durch eine hohe Wahrscheinlichkeit der anderen Ausprägungskombinationen kompensiert wird. Dadurch können Szenarien entworfen werden, in denen physikalisch unsinnige FEP-Kombinationen auftreten.

## Literatur

- GAUSEMEIER, J.; FINK, A. & SCHLAKE, O. (1996): Szenario-Management, Planen und Führen mit Szenarien.-- 2. Aufl.: 390 S.; München (Carl Hanser) - ISBN 3-446-1721-9.
- KELLER, S. (2002): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). Zusammenstellung von geologischen, klimatischen und hydrogeologischen ZEP. 1. Zwischenbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber., **0122272**: 62 S., 15 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- KELLER, S. (2003a): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). Bewertung von ZEP (Zustände, Ereignisse, Prozesse). 2. Zwischenbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 22 S., 4 Abb., 1 Tab., 1 Anh.; Hannover.
- KELLER, S. (2003b): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). Generierung von Szenarien mit dem Programm "Szenario.Plus". 3. Zwischenbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber., **0123978**: 35 S., 2 Abb., 1 Tab., 3 Anh.; Hannover.
- KELLER, S. (2004): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). Zeitliche Aspekte bei der Analyse von Szenarien. 4. Zwischenbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber., **0125546**: 64 S., 23 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- KELLER, S. (2006): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). - Beschreibung der Wirkung von Fernfeld-FEPs auf Grundlage eines geologischen Standortmodells (Wirtsgestein Salz). 5. Zwischenbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber., **0126614**: 101 S., 17 Abb., 6 Tab.; Hannover.
- KELLER, S. (2007): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). - Abschlussbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber., **0126938**: 33 S., 5 Abb., 1 Tab.; Hannover.

Wie stark beeinflusst Zeile / Spalte	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	Aktiv- summe	Produkt / Vernetzung
2 Diapirismus	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	9	54
3 Diffusion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 Erosion	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	48
6 Gasdruck	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	1	0	0	2	0	2	1	1	0	13	130
7 Gaseindringdruck	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	6	72
8 Imprägnierung	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	6	60
9 Kaltzeit mit Permafrost	0	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	8	0
10 Kaltzeit mit Permafrost und Inlandeis	1	1	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	2	0	2	0	0	0	0	13	0
11 Kaltzeit mit vollst. Inlandvereisung	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	3	0	0	0	0	14	0
12 Konvergenz	0	1	0	2	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3	0	3	0	14	196
14 Nat. Gas- u. Lösungsvorkommen (NGL)	0	1	0	0	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	1	0	2	0	0	0	10	80
15 Rissbildung	0	3	0	2	3	2	0	0	0	0	2	0	1	0	2	0	0	0	0	0	15	105
16 Subrosion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	26
17 Sedimentation	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	18
18 Thermische u. mech. Wechselwirkungen	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	10	130
19 Transgression/Regression	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	6	36
21 Verschluss von Kluftsystemen	0	2	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	7	84
22 Wärmeausdehnung	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	4	20
23 Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	24
24 Zerfallsenergie (-wärme)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	3	0	2	3	0	0	13	0
<b>Passivsumme</b>	<b>6</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>13</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>0</b>		
<b>Quotient / Beeinflussbarkeit</b>	<b>1,5</b>	<b>0,0</b>	<b>0,3</b>	<b>1,3</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>~</b>	<b>~</b>	<b>~</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>2,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>~</b>		

Abbildung 1: Einflussmatrix, System Wirtsgestein, 0 – 10.000 Jahre.

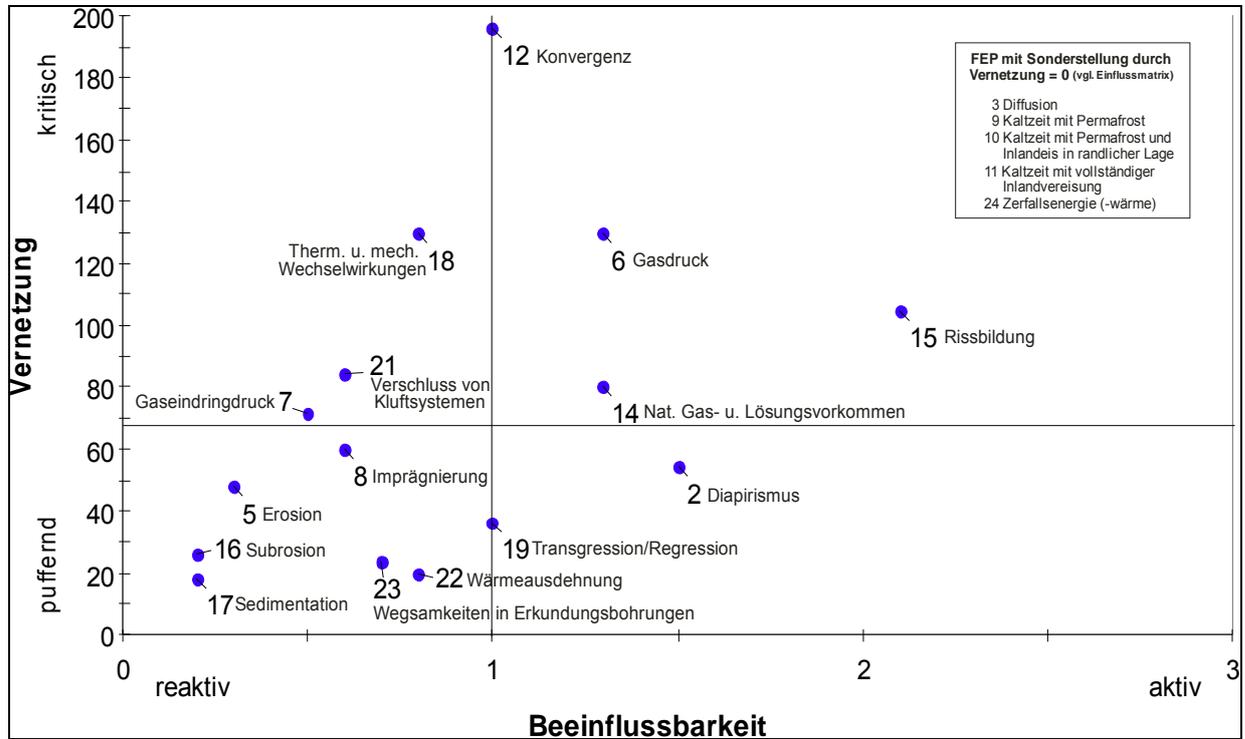


Abbildung 2: Einflussdiagramm, System Wirtsgestein, 0 – 10.000 Jahre.

FEP-Ausprägung	3A	3B	6A	6B	7A	7B	8A	8B	12A	12B	14A	14B	15A	15B	18A	18B	21A	21B	24A	24B	
3 Diffusion A Matrixdiffusion																					
3 Diffusion B Porenraumdiffusion																					
6 Gasdruck A Geringer Gasdruck	3	3																			
6 Gasdruck B Hoher Gasdruck	3	3																			
7 Gaseindringdruck A Geringer Gaseindringdruck	2	4	3	3																	
7 Gaseindringdruck B Hoher Gaseindringdruck	4	2	3	3																	
8 Imprägnierung A Findet statt	2	4	2	5	4	2															
8 Imprägnierung B Findet nicht statt	4	3	4	2	2	4															
12 Konvergenz A Geringe Konvergenz	3	3	4	5	3	3	3	3													
12 Konvergenz B Starke Konvergenz	3	3	2	2	3	3	3	3													
14 Nat. Gas- u. Lösungsvorkommen (NGL) A Vorhanden	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3											
14 Nat. Gas- u. Lösungsvorkommen (NGL) B Nicht vorhanden	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3											
15 Rissbildung A Rissbildung findet statt	3	4	4	5	3	3	4	3	2	4	3	3									
15 Rissbildung B Rissbildung findet nicht statt	3	3	3	3	3	3	3	3	4	2	3	3									
18 Therm. u. mech. Wechselwirkungen A Integrität wird verbessert	3	2	5	2	2	5	2	4	4	5	3	3	2	5							
18 Therm. u. mech. Wechselwirkungen B Integrität wird vermindert	4	5	2	4	4	2	5	2	2	2	3	3	5	3							
21 Verschluss von Klufsystemen A Verschluss findet statt	3	3	2	2	4	4	2	3	4	5	3	3	2	4	4	2					
21 Verschluss von Klufsystemen B Verschluss findet nicht statt	3	4	4	5	3	3	4	3	2	2	3	3	4	2	2	4					
24 Zerfallsenergie (-wärme) A Hoher Wärmeeintrag	5	5	3	3	3	3	3	3	2	5	3	3	2	4	2	5	4	2			
24 Zerfallsenergie (-wärme) B Geringer Wärmeeintrag	4	4	3	3	3	3	3	3	4	2	3	3	4	2	4	3	2	4			

Abbildung 3: Konsistenzmatrix System Wirtsgestein.

<b>Wirtsgestein</b>		30.11.2007
Szenariobildung		Seite 1
<b>Szenario Rohszenario 2_28 1 07</b>		
<b>Deskriptor</b>	<b>Ausprägung</b>	
3. Diffusion	A	Matrixdiffusion
6. Gasdruck	B	Hoher Gasdruck
7. Gaseindringdruck	A	Geringer Gaseindringdruck
8. Imprägnierung	A	Findet statt
12. Konvergenz	A	Geringe Konvergenz
14. Nat. Gas- u. Lösungsvorkommen (NGL)	A	Vorhanden
15. Rissbildung	A	Rissbildung findet statt
18. Therm. u. mech. Wechselwirkungen	B	Integrität wird vermindert
21. Verschluss von Kluftsystemen	B	Verschluss findet nicht statt
24. Zerfallsenergie (-wärme)	A	Hoher Wärmeeintrag

Abbildung 4: Durch Clusteranalyse definiertes Rohszenario.

**Anhang 5:**

Grafische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen FEP

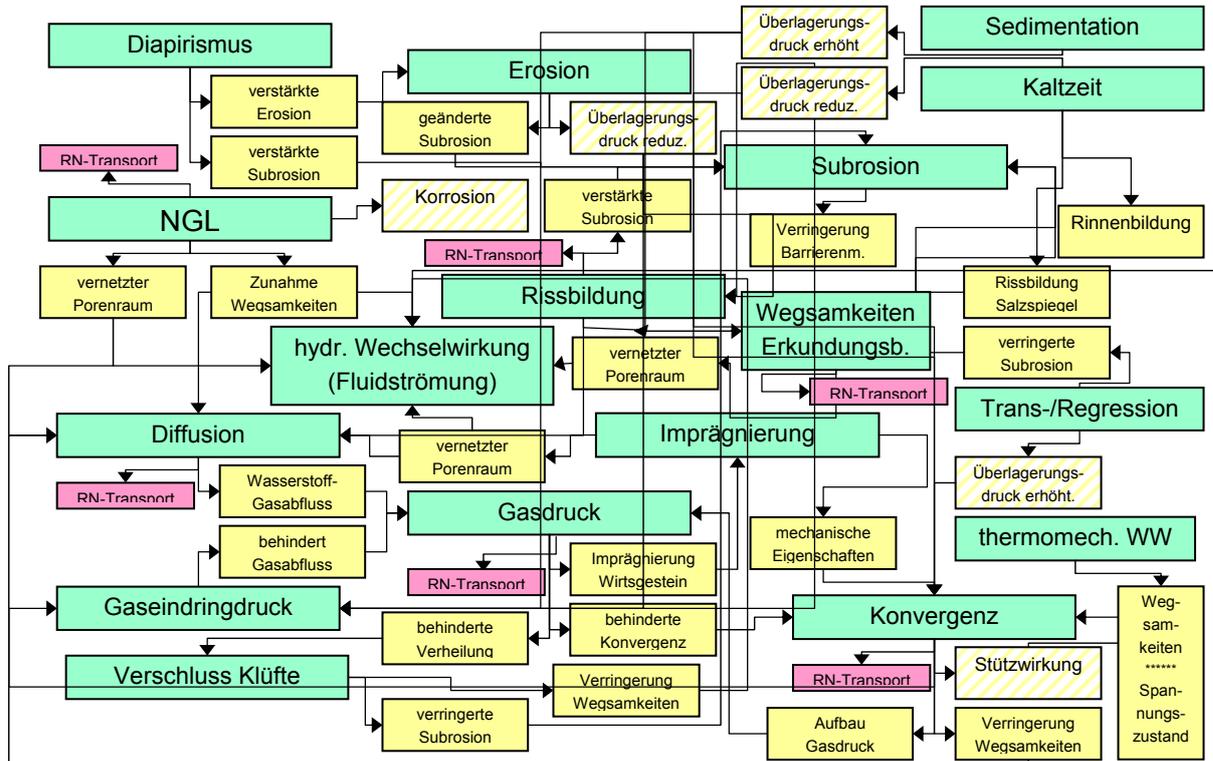


Abbildung 1: Vernetzung von FEP im System Wirtsgestein

In Abbildung 1 sind FEP grün und Wirkungen gelb dargestellt. Wirkungen in anderen Systemen als dem System Wirtsgestein sind schraffiert eingefärbt und direkte Auswirkungen auf einen etwaigen Radionuklidtransport rot markiert. Nachdem die in Abbildung 1 dargestellte grafische Verknüpfung der Wirkungen von FEP erkennen ließ, dass sie keine Identifizierung von FEP-Gruppen, die einer isolierten Betrachtung zugänglich erscheinen, zulassen würde, wurde auf die Darstellung weiterer Verknüpfungen verzichtet. Insofern erhebt die Abbildung der Wechselwirkungen von FEP keinen Anspruch auf Vollständigkeit.