

Projekt ANSICHT

FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD

- Konzept und Aufbau -



PROJ	PSP	OBJ	FUNK	KOMP	BAUG	AG	UA	LFNR	RV
FE						BE	BY	0007	00

DOKID: 11780524
ULV-Nr.: 659480

Projekt ANSICHT

FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD

- Konzept und Aufbau -

Autoren:

L. Stark (Koordinatorin)
S. Jahn
M. Jobmann
A. Lommerzheim
A. Meleshyn
S. Mrugalla
K. Reinhold
A. Rübel

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

Auftraggeber:

KIT (PTKA-WTE)

FKZ: 02E11061A/B

Berichtsnummer:

TEC-16-2016-TB

30.03.2016

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi von der BGR sowie vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) unter den Förderkennzeichen 02E11061A und 02E11061B von der GRS bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Weiterentwicklung der Methodik	5
2.1	Zustände (Features)	8
2.2	Eigenschaften.....	9
2.3	Prozesse (Processes).....	13
3	Anforderungen an den FEP-Katalog	15
4	Vorgehensweise bei der Erstellung des FEP-Kataloges	17
4.1	Ausgangszustand des Endlagersystems	17
4.2	Abhängigkeiten zwischen den FEP.....	17
4.3	Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit.....	20
4.4	Ansatzpunkte für die Szenarienentwicklung.....	22
4.5	Transparenz und Nachvollziehbarkeit	23
4.6	Identifizierung offener Fragen	23
5	Aufbau der FEP-Einträge.....	25
5.1	Definition/Kurzbeschreibung	27
5.2	Allgemeine Informationen und Beispiele	27
5.3	Prozess oder Zustandsbeschreibung.....	28
5.4	Eigenschaftsliste der Zustände.....	28
5.5	Zeitliche Beschränkung	28
5.6	Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit.....	28
5.7	Direkte Abhängigkeiten und Begründung der Abhängigkeiten	29
5.8	Konsistenzcheck.....	30
5.9	Offene Fragen	31
5.10	Literaturquellen.....	31
6	Zusammenfassung	33
7	Literaturverzeichnis.....	35
ANHANG A	FEP-Schema SÜD.....	38
ANHANG B	Vergleich zwischen den ANSICHT FEP-Listen NORD und SÜD.....	39
ANHANG C	Konsistenzcheck der Eigenschaften	47

1 Einleitung

Das Vorhaben ANSICHT hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Tongestein zu entwickeln und deren Anwendbarkeit für generische Endlagerstandorte in Nord- und Süddeutschland zu testen. Von zentraler Bedeutung für die Analyse der Sicherheit eines Endlagersystems sind die Auswahl, Bezeichnung und Dokumentation aller Zustände, Ereignisse und Prozesse (engl. Features, Events, Processes, kurz FEP), die sich auf die zukünftige Entwicklung am Standort auswirken und insbesondere die Langzeitsicherheit beeinträchtigen könnten (NEA/OECD 2000).

Die Anforderungen an die Langzeitsicherheit eines Endlagersystems im Wirtsgestein Tongestein sind im Bericht zum Sicherheitskonzept und der Nachweisstrategie (Rübel & Meleshyn 2014) erörtert. Danach basiert die Sicherheit eines Endlagers darauf, einen möglichst weitgehenden, dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich zu erreichen und zu erhalten. Ziel ist der Nachweis, dass die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010) erfüllt werden. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit sind neben der jetzigen Situation an einem potenziellen Standort, zukünftig mögliche Entwicklungen des Endlagersystems zu berücksichtigen (Lommerzheim et al. 2015).

Zur Erfassung aller sicherheitsrelevanten Zustände, Ereignisse und Prozesse wurde von den am Projekt beteiligten Gesellschaften (DBETec¹, GRS² und BGR³) für das generische Standortmodell SÜD inklusive des Endlagerkonzeptes eine spezifische FEP-Liste zusammengestellt. Ausgangspunkt für die hier erstellte FEP-Liste war die FEP-Liste für das Endlagerstandortmodell NORD (Stark et al. 2015). Diese wurde aber im Verlauf des Projektes ANSICHT durch die Weiterentwicklung der Methodik modifiziert und im vorliegenden Bericht dokumentiert. Sämtliche in dieser FEP-Liste vertretene FEP wurden im Detail ausgearbeitet und beschrieben und bilden so letztendlich den FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD.

Analog zur Dokumentation für den FEP-Katalog NORD (Stark et al. 2015) dient der vorliegende Bericht dazu, die Struktur und Inhalte des FEP-Kataloges SÜD (sowohl des technischen Berichtes als auch der Datenbank) zu verdeutlichen. Er erläutert die Weiterentwicklung der Methodik (Kapitel 2), die Anforderungen an den FEP-Katalog (Kapitel 3) sowie die Vorgehensweise bei der Erstellung des FEP-Kataloges SÜD (Kapitel 4), beschreibt den Aufbau der FEP-Einträge in der Datenbank bzw. im technischen Bericht (Kapitel 5) und fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeiten im Rahmen der Erstellung des FEP-Kataloges zusammen (Kapitel 6).

¹ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETec)

² Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)

³ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

2 Weiterentwicklung der Methodik

Die Grundlagen und bisherigen Arbeiten der Methodik sind im Bericht zum FEP-Katalog NORD (Stark et al. 2015) erläutert. Während bei der Erstellung des FEP-Katalogs für das Endlagerstandortmodell NORD weitgehend auf der VSG-Methodik aufgebaut wurde, wurden bei der Erstellung des FEP-Kataloges SÜD die Erfahrungen aus der bisherigen Arbeit genutzt, um die Methodik bei der Erstellung des FEP-Kataloges weiter zu entwickeln.

Für die Methodik des Sicherheitsnachweises ist der FEP-Katalog das zentrale Verbindungselement zwischen den Grundlagen (Endlagerkonzept und Verfüll- und Verschlusskonzept, generisches Endlagerstandortmodell und geowissenschaftliche Langzeitprognose), der Szenarienentwicklung und der Nachweisführung. Der FEP-Katalog ist zum einen die Voraussetzung für eine systematische Szenarienentwicklung und damit für eine vollständige Systembeschreibung. Zum anderen liefert er Basisinformationen für die Analysen zur Integrität der geologischen und vor allem der geotechnischen Barrieren sowie für die radiologische Konsequenzenanalyse (Jobmann et al. 2016).

Primäre Ziele der methodischen Weiterentwicklung waren eine klarere und eindeutige Strukturierung des FEP-Katalogs und eine nachvollziehbarere Dokumentation jener Informationen, die für die nachfolgende Szenarienentwicklung eine Rolle spielen. Erreicht wurden diese Ziele vor allem durch die Vermeidung von doppelten, sich überschneidenden Beschreibungen gleicher Zustände oder Prozesse in unterschiedlichen FEP. Zur Umsetzung der Ziele wurden für die Erstellung des FEP-Kataloges zusätzlich zur bisher verwendeten Methodik folgende Regeln zu Grunde gelegt:

1. Klare Zuordnung

Jedes FEP wird jeweils in eine der beiden Kategorien „Zustand“ bzw. „Prozess“ eingeteilt. Diese FEP werden dann entsprechend Zustands-FEP, bzw. Prozess-FEP, genannt. Es gibt gegenüber dem FEP-Katalog SÜD für das Endlagerstandortmodell NORD keine sogenannten Misch-FEP mehr, die beiden Gruppen angehören, wie das noch im FEP-Katalog NORD der Fall war.

2. Wechselwirkungen nur zwischen Zuständen und Prozessen

Wechselwirkungen zwischen verschiedenen FEP existieren nur zwischen Zuständen und Prozessen. Es gibt im FEP-Katalog keine Wechselwirkung zwischen zwei Zuständen oder zwei Prozessen. Da sowohl die Beschreibung der Zustände als auch jene der Prozesse schnittmengenfrei sind, sind die Wechselwirkungen eindeutig zuzuordnen.

3. Nicht-Begründungen

Um den Informationsgehalt zu erhöhen, werden nun auch Nicht-Begründungen angegeben, d. h. es wird dokumentiert, warum zu bestimmten FEP keine Abhängigkeit besteht.

4. Keine parallelen Abhängigkeiten

FEP, die vorher einzelne hervorzuhebende Aspekte betrachtet haben, die aber inhaltlich einem anderen FEP zugeordnet werden können, werden zusammengefasst, um parallele Abhängigkeiten und doppelte, sich überschneidende Beschreibungen zu vermeiden. Deshalb ist z. B. das bisher im FEP-Katalog NORD bestehende FEP *Störungen und Klüfte* Teil der FEP *Nebengebirge und Wirtsgestein* und das bisher bestehende FEP *Erdbeben* Teil des FEP *Spannungsfortpflanzung*. Teilweise gehen auch FEP-Inhalte in den Beschreibungen der Eigenschaften (vgl. Kapitel 2.2) mit auf, so wurde z. B. das FEP *Resthohlräume* gestrichen und die Inhalte in der Eigenschaft *Porosität* mit erfasst (siehe Eigenschaftsdefinition). Das FEP *Fluiddruck* wird nun als Eigenschaft *Fluiddruck* im jeweiligen Zustands-FEP beschrieben sowie im Prozess *Spannungsfortpflanzung*.

5. Relevanz

Einzelne FEP im FEP-Katalog SÜD haben aufgrund der Standortbedingungen im Vergleich zum FEP-Katalog NORD eine unterschiedliche Relevanz. So wird das FEP *Kohlenwasserstoffe* aufgrund des geringen Gehaltes an Kohlenwasserstoffen im Bereich des Endlagerstandortmodells SÜD gestrichen und die Inhalte werden in den FEP *Lösungen im Wirtsgestein* und *Lösungen im Nebengebirge* sowie *Gase im Wirtsgestein* und *Gase im Nebengebirge* mit beschrieben.

6. Ereignisketten

Es werden keine Prozesse im FEP-Katalog aufgenommen, die eine Ereigniskette mehrerer aufeinander folgender Prozesse darstellen. Beispielsweise stellt das frühere FEP *Versagen eines Verschlussbauwerks* bereits eine Art Szenarium dar.

7. Keine Dopplungen im FEP-System

Es soll eine Vermeidung von doppelten, sich überschneidenden Beschreibungen in unterschiedlichen FEP erreicht werden. So wurden beispielsweise einzelne FEP gestrichen und deren Inhalte in anderen FEP mit korrespondierenden Inhalten behandelt. Beispielsweise wurde das FEP *Diagenese* gestrichen und der Inhalt in den Alterations-FEP mit behandelt, da es Mineralumwandlungen betrifft. Teilweise gehen auch FEP-Inhalte in den Beschreibungen der Eigenschaften (vgl. Kapitel 2.2) mit auf, so wurde z.B. das FEP *Resthohlräume* gestrichen und die Inhalte in der Eigenschaft *Porosität* mit erfasst (siehe Eigenschaftsdefinition).

Um den Informationsgehalt der FEP-Beschreibungen und der Begründungen der Wechselwirkungen zwischen den FEP zu erhöhen, wird die neue Kategorie „Eigenschaften“ eingeführt (siehe Kapitel 2.2). Unter dieser Kategorie sollen fortan die Eigenschaften von Zustands-FEP beschrieben werden, die durch die einwirkenden Prozesse geändert werden oder den Ablauf von Prozessen beeinflussen können. Beispielsweise kann das Prozess-FEP *Spannungsfortpflanzung* die Eigenschaft „Porosität“ und damit auch die „Permeabilität“ eines Verschlussbauwerkes, also eines Zustands-FEP ändern. Auf der anderen Seite kann die geänderte „Porosität“ und „Permeabilität“ eines Verschlussbauwerkes (Zustands-FEP) den Ablauf bzw. die Ausprägung der Prozess-FEP Strömungsvorgänge, Dispersion und Diffusion verändern.

Die Inhalte der FEP-Beschreibungen im vorliegenden FEP-Katalog SÜD sind analog zum FEP-Katalog NORD keine standortunabhängigen Betrachtungen, sondern beziehen sich auf die spezifischen geologischen Zustände des generischen Standortmodells SÜD (Reinhold et al. 2014) und des Endlager-, sowie Verfüll- und Verschlusskonzeptes (Jobmann & Lommerzheim 2015). Der ausgearbeitete FEP-Katalog ist daher nicht unmittelbar auf einen anderen Standort im Tongestein zu übertragen, stellt aber eine charakteristische Situation im westlichen Molassebecken, nahe dem nordwestlichen Beckenrand, dar. Für das generische Endlagerstandortmodell SÜD wurde die Opalinuston-Formation als Wirtsgestein festgelegt (Reinhold & Sönke 2012).

Die Tabelle im Anhang B zeigt die Unterschiede der im FEP-Katalog NORD und im FEP-Katalog SÜD erstellten FEP-Listen. Die weiterentwickelte FEP-Liste SÜD enthält nun insgesamt 68 FEP, wovon 24 FEP die Bestandteile im Grubengebäude und in der Geosphäre beschreiben und 43 FEP Prozesse darstellen. Durch die zusätzlich eingeführte Kategorie „Eigenschaften“ ergibt sich eine Änderung in der Darstellung von direkten wechselseitigen Abhängigkeiten der einzelnen FEP aus der FEP-Liste. Bei den Wechselwirkung zwischen einem Zustand und einem Prozess wird zusätzlich angegeben, auf welche Eigenschaften eines Zustandes ein Prozess einwirkt, bzw. welche Eigenschaften einen Prozess beeinflussen (Abb. 2.1). Die vollständige FEP-Liste befindet sich in Anhang A.

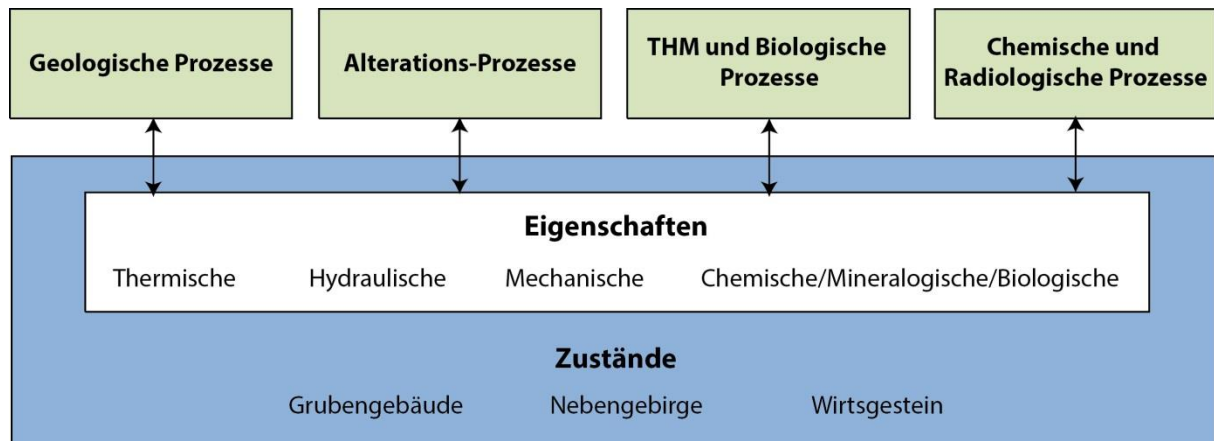


Abb. 2.1: Darstellung der direkten wechselseitigen Abhängigkeiten der Prozess-FEP und der Zustands-FEP über die Eigenschaften der Zustände.

Ein konkretes Beispiel für die Wirkungen zwischen Prozessen und den Eigenschaften der Zustände ist in Abb. 2.2 gezeigt. Dort wirkt der Prozess *Spannungsfortpflanzung* auf den Zustand *Streckenverschluss*. Durch spannungsgetriebene Verdichtung kann sich die *Porosität* und damit auch die *Permeabilität* des *Streckenverschlusses* und zwar explizit die des Bentonit-Dichtelementes verändern. Diese Veränderung des Zustandes kann wiederum den Prozess *Strömungsvorgänge* verändern. Der Prozess *Alteration von sonstigen Mineralen* wirkt ebenfalls auf den Zustand *Streckenverschluss* ein, aber auf ein anderes Bestandteil, in diesem Fall auf die Eigenschaft *Festigkeit* des Widerlagers. Diese Eigenschaftsveränderung kann wiederum den Prozess der *Spannungsfortpflanzung* in seiner Ausprägung verändern.

Durch die Zuordnung auf die Eigenschaften einzelner Bestandteile eines Verschlussbauwerkes wird auch die Schnittstelle des FEP-Kataloges zum Integritätsnachweis der geotechnischen Barrieren gestärkt.

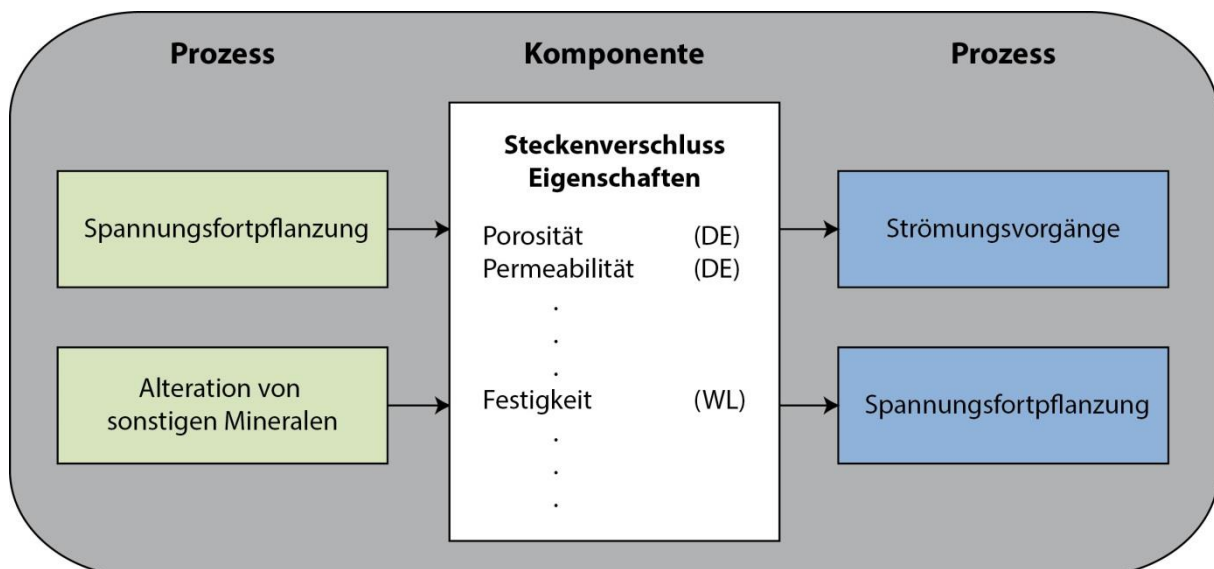


Abb. 2.2: Schematisierte Wirkreihenfolge zwischen Prozessen und den Eigenschaften der Zustände.

2.1 Zustände (Features)

Ein Zustands-FEP entspricht einem Bestandteil des Endlagersystems (z. B. *Wirtsgestein*) mit dessen Eigenschaften (z. B. *Permeabilität*, *Porosität* usw.). Für jedes Zustands-FEP werden alle für die Entwicklung des Endlagersystems wesentlichen Eigenschaften angegeben.

Die Gesamtmenge aller Zustands-FEP beschreibt das Endlagersystem vollständig und schnittmengenfrei.

Die Aufteilung in Teilsysteme, wie sie noch im FEP-Katalog NORD vorgenommen wurde, wird aufgehoben. Daher muss nicht mehr explizit in jedem FEP angegeben werden, in welchem Teilsystem es wirkt. Durch die klare Zuordnung können die Zustände nun automatisch einem Bereich, entweder dem Grubengebäude, wie für alle technischen Bestandteile des Endlagersystems zutreffend, oder dem Wirtsgestein bzw. Nebengebirge zugeordnet werden (Abb. 2.3). Diese Aufteilung spiegelt, wie auch im FEP Katalog NORD, den physischen Aufbau des Multibarrierensystems Endlager wider.

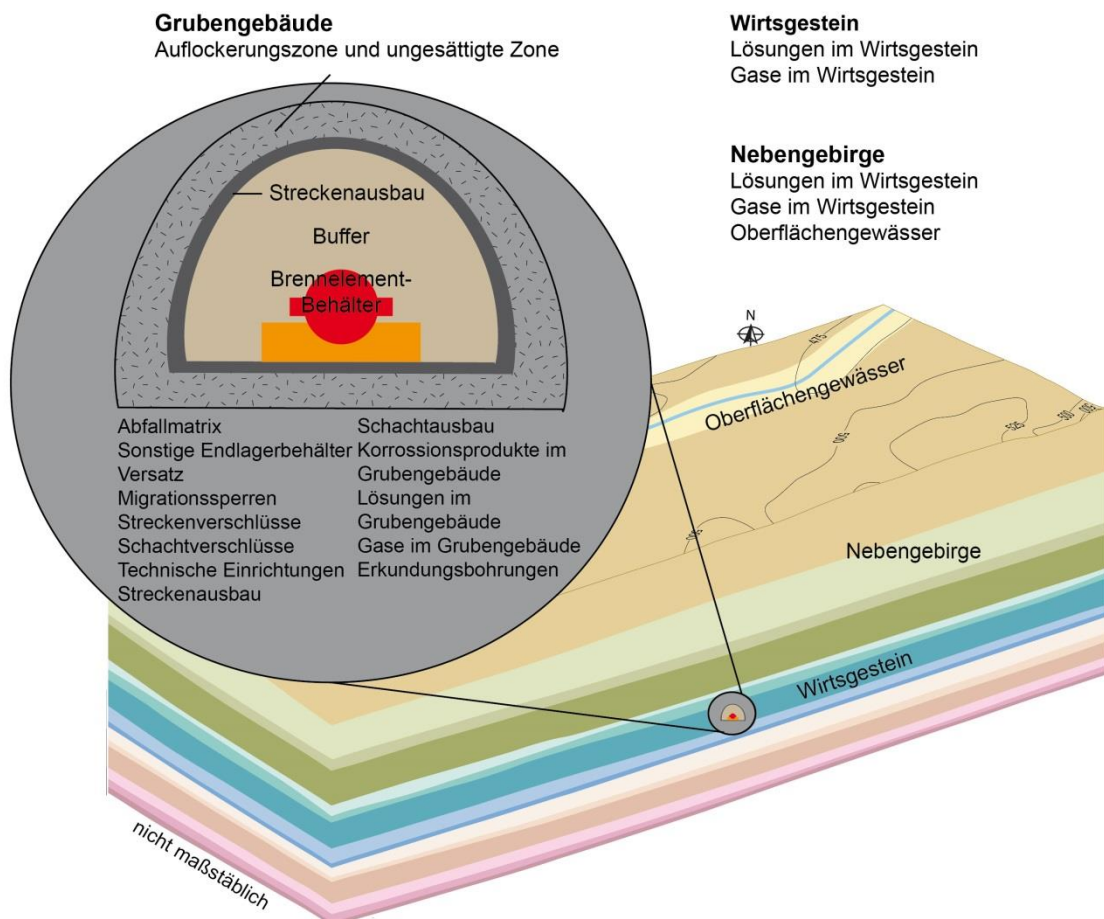


Abb. 2.3: Die Zustands-FEP beschreiben das Endlagersystem vollständig und schnittmengenfrei und werden entweder dem Grubengebäude, dem Wirtsgestein bzw. dem Nebengebirge zugeordnet.

In der Geosphäre erfolgt die Beschreibung der Bestandteile in den drei Phasen fest, flüssig und gasförmig, da diese sehr unterschiedlich mit den Prozessen wechselwirken. So wird zwischen Feststoffen, z. B. das FEP *Nebengebirge*, flüssigen Stoffen in den Porenräumen im FEP *Lösungen im Nebengebirge* und gasförmigen Stoffen im FEP *Gase im Nebengebirge*

unterschieden. Übergänge zwischen den jeweiligen Phasen werden in dem Prozess *Phasenübergänge* abgebildet. Durch die Kategorisierung ergeben sich wiederum Änderungen in den Abhängigkeiten. Bestimmte Prozesse, wie zum Beispiel die Thermochemische Sulfatreduktion, laufen nur in den Lösungen ab und weisen deshalb auch nur Verknüpfungen zu diesen Zuständen auf.

2.2 Eigenschaften

Um die Wechselwirkung zwischen einem Zustand und einem Prozess besser und nachvollziehbarer beschreiben zu können, wurden für die Zustände sogenannte „Eigenschaften“ eingeführt. Bei den Wechselwirkung zwischen einem Zustand und einem Prozess wird in den Begründungen für die Wechselwirkung zusätzlich angegeben, auf welche Eigenschaften eines Zustands ein Prozess einwirkt, bzw. welche Eigenschaften eines Zustandes einen Prozess beeinflussen. Diese Wechselwirkungen werden jeweils inhaltlich begründet. Manche Eigenschaften, wie z. B. *Dichte* und *Volumen*, sind miteinander gekoppelt. Wenn sich also die Eigenschaft *Dichte* ändert, dann ändert auch die Eigenschaft *Volumen*. Auch ändern sich stoffspezifischen Materialeigenschaften automatisch, wenn sich die stoffliche Zusammensetzung ändert (z.B. eine Änderung der Eigenschaft *Wärmeleitfähigkeit* durch die Änderung der Eigenschaft *stofflichen Zusammensetzung*). Diese Kopplung kann teilweise aufgrund der Geringfügigkeit der gekoppelten Änderungen der Materialeigenschaften vernachlässigt werden.

bei einer Änderung der stofflichen Zusammensetzung können sich durch generelle Zusammenhänge der stoffspezifischen physikalischen Größen (z.B. Wärmeleitfähigkeit. In manchen Fällen sind können die gekoppelten Eigenschaften mit einer Begründung, z.B.

Die Eigenschaften der Zustands-FEP gliedern sich in vier verschiedenen Klassen:

- Thermische Eigenschaften
- Hydraulische Eigenschaften
- Mechanische Eigenschaften
- Chemische/Mineralogische/Biologische Eigenschaften

Im Folgenden werden die einzelnen Eigenschaften der vier Klassen aufgelistet und jeweils definiert, was im Zusammenhang mit der FEP-Beschreibung darunter zu verstehen ist.

Thermische Eigenschaften

Wärmeleitfähigkeit

Die *Wärmeleitfähigkeit* ist eine lokale stoffspezifische physikalische Größe, die die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung beschreibt. Die Wärmeleitfähigkeit ist prinzipiell eine anisotrope Materialeigenschaft und damit eine tensorielle Größe. D. h., sie kann in unterschiedlichen Raumrichtungen unterschiedliche Werte annehmen. Sie ist prinzipiell abhängig vom Druck, der Temperatur und bei porösen Körpern auch von der Porosität und der Porenfüllung (Fluid). Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffs ist definiert durch die Gleichung der stationären Wärmeleitung $q = -\lambda \text{ grad } T$, d. h. als Proportionalitätsfaktor zwischen der Wärmestromdichte q und der räumlichen Änderung der Temperatur T (Temperaturgradient); das negative Vorzeichen bedeutet dabei einen Wärmestrom von höheren zu niedrigeren Temperaturen. λ gibt die Wärmemenge an, die im stationären Zustand je Sekunde durch eine Fläche von 1 m^2 fließt, wenn senkrecht dazu ein Temperaturgefälle von 1 K pro Meter herrscht. Die SI-Einheit der Wärmeleitfähigkeit ist $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Spezifische Wärmekapazität

Die Wärmekapazität eines Körpers gibt an, wie viel thermische Energie der Körper bezogen auf eine Temperaturänderung ΔT aufnimmt oder abgibt. Die *spezifische Wärmekapazität* ist die auf die Masse des Körpers bezogene Wärmekapazität. Die umgesetzte Energie hängt im Allgemeinen von der Prozessführung bei der Temperaturänderung ab. Man definiert daher insbesondere die Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p und die Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_v . Abgesehen von Gasen ist der Unterschied aber meist vernachlässigbar. Die SI-Einheit der spezifischen Wärmekapazität ist J/(kg·K).

Temperatur

Die *Temperatur* beschreibt den Wärmezustand eines Körpers. Sie kennzeichnet das thermodynamische Gleichgewicht: Wenn zwei Körper dieselbe Temperatur haben, dann fließt keine Wärme zwischen ihnen, auch wenn sie miteinander in direktem Kontakt stehen. Unterscheidet sich jedoch die Temperatur der beiden Körper, so fließt Wärme vom Körper höherer Temperatur zu dem mit niedrigerer Temperatur bis sich die Temperaturen einander angeglichen haben. Die Gleichgewichtstemperatur liegt dann zwischen den beiden Ausgangstemperaturen. Die SI-Einheit der Temperatur ist Kelvin.

Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist ein Kennwert, der das Verhalten eines Stoffes bezüglich Veränderungen seiner Abmessungen bei Temperaturveränderungen beschreibt; deswegen oft auch *thermischer Ausdehnungskoeffizient* genannt. Der hierfür verantwortliche Effekt ist die temperaturabhängige Änderung der Dichte. Da die Wärmeausdehnung bei vielen Stoffen nicht gleichmäßig über alle Temperaturbereiche erfolgt, ist auch der Wärmeausdehnungskoeffizient selbst temperaturabhängig und wird deshalb für eine bestimmte Bezugs-temperatur oder einen bestimmten Temperaturbereich angegeben. Es wird zwischen dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten (auch linearer Wärmeausdehnungskoeffizient) und dem thermischen Raumausdehnungskoeffizienten (auch räumlicher Ausdehnungskoeffizient oder Volumenausdehnungskoeffizient oder kubischer Ausdehnungskoeffizient) unterschieden. Für isotrope Festkörper gilt, dass sich die Längenänderung in allen drei Raumrichtungen gleich verhält. Für isotrope Festkörper kann das Dreifache des Längenausdehnungskoeffizienten verwendet werden, um die Volumenausdehnung zu berechnen. Für die FEP-Beschreibungen kann in erster Näherung diese vereinfachte „isotrope“ Beziehung angewendet werden, um die Volumenausdehnung zu beschreiben. Die SI-Einheit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist 1/K.

Diffusionskoeffizient

Der *Diffusionskoeffizient*, auch Diffusionskonstante oder Diffusivität genannt, ist der Proportionalitätsfaktor in den Fickschen Gesetzen zur Berechnung der thermisch bedingten zufälligen Bewegung eines Teilchens in einem Gas oder einer Lösung. Der Diffusionskoeffizient ist daher ein Maß für die Beweglichkeit der Teilchen. Zur Angabe des Diffusionskoeffizienten gehört immer die Angabe, welcher Stoff in welchem Stoff diffundiert, sowie als wichtigste Einflussgröße die Temperatur. SI-Einheit des Diffusionskoeffizienten ist m²/s. Die Diffusion in Feststoffen wird im FEP-Katalog nicht betrachtet.

Hydraulische Eigenschaften

Permeabilität

Die *Permeabilität* ist eine Kenngröße für die Durchströmbarkeit eines porösen oder geklüfteten Mediums. Die Eigenschaft Permeabilität umschließt auch die teilweise verwendeten Kenngrößen hydraulische Leitfähigkeit und hydraulischer Widerstand inkl. der technischen Barrieren. Eine geringe Permeabilität ist gleichbedeutend mit einem hohen Strömungswiderstand. Die SI-Einheit der Permeabilität ist m².

Porosität

Die *Porosität* ist das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu dem gesamten Volumen eines Festkörpers. Die effektive Porosität bezeichnet den Porenanteil, der miteinander verbunden ist und somit für Strömungs- und Transportprozesse die relevante Größe darstellt. Die Porosität schließt einerseits auch Resthohlräume innerhalb der Behälter und in der Umgebung technischer Bestandteile ein (Firstspalte, Kontaktzonen) und andererseits auch offene Risse in Verschlussbauwerken und Diskontinuitäten in der geologischen Barriere. Die Eigenschaft Porosität umfasst im ANSICHT-FEP-Katalog auch alle Eigenschaften, die mit der Porenraumstruktur zusammenhängen, wie z. B. die teilweise verwendeten Kenngrößen *Tortuosität* und *Konstriktivität*. Die Porosität ist dimensionslos.

Kompressibilität

Die *Kompressibilität* bezeichnet im ANSICHT-FEP-Katalog ausschließlich eine Eigenschaft von Gasen und ist eine Kenngröße für die Abhängigkeit des Gasdrucks bei einer Veränderung des Volumens. Sie ist der Kehrwert des Kompressionsmoduls. Die SI-Einheit der Kompressibilität ist 1/Pa.

Fluiddruck

Der *Fluiddruck* bezeichnet den Druck von Lösungen und/oder Gasen in einem Volumen. Die SI-Einheit des Fluiddrucks ist Pa.

Viskosität

Die *Viskosität* ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Der Kehrwert der Viskosität ist die Fluidität, ein Maß für die Fließfähigkeit eines Fluids. Je größer die Viskosität, desto dickflüssiger (weniger fließfähig) ist das Fluid; je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger (fließfähiger) ist es, kann also bei gleichen Bedingungen schneller fließen. Man unterscheidet zwischen der dynamischen und der kinematischen Viskosität. Die dynamische Viskosität und die kinematische Viskosität stehen über die Dichte in direktem Zusammenhang. Die Einheit der Viskosität ist Pa·s.

Mechanische Eigenschaften**Dichte**

Die *Dichte* ist der Quotient aus der Masse eines festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffes und seinem Volumen. Die SI-Einheit ist kg/m³.

Volumen

Das *Volumen* ist der Rauminhalt eines festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffes, der eine bestimmte Ausdehnung aufweist. Die SI-Einheit ist m³.

Festigkeit

Die *Festigkeit* beschreibt das Widerstandsverhalten eines Festkörpers gegenüber Verformungen. Man kann nach Belastungsart und -richtung beispielsweise zwischen Zug-, Druck- und Scherfestigkeit unterscheiden. Im Allgemeinen beschreibt die Festigkeit eine Grenzspannung, ab der sich das Spannungs-Dehnungsverhalten charakteristisch verändert, was u. a. zum Reißen, plastischen Fließen oder Brechen führen kann. Die SI-Einheit der Festigkeit ist Pa.

Deformationsvermögen

Der Begriff *Deformationsvermögen* beschreibt das Verformungsverhalten von Festkörpern, das im Allgemeinen durch eine Änderung der Spannungen hervorgerufen wird. Die maximal erreichbare Verformung wird entweder beim Eintreten irreversibler Veränderungen der Materialeigenschaften (Schädigung, plastisches Fließen, Dilatanz) erreicht, was dem elastischen Verformungsvermögen entspricht, oder beim Materialversagen (Bruch), womit

das „Gesamt“-Verformungsvermögen abgebildet ist. Die Deformation hängt von vielen Einflussgrößen ab, z. B. von

- der Größe und Art der mechanischen Belastung: eine Zugbelastung führt im Vergleich zu einer Scherbelastung nicht nur zu ganz anderen (meist viel geringeren) maximalen Deformationen, sondern auch zu einer anderen Art von Verformung (lineare Verformung im Gegensatz zu Scherverformung),
- den Materialeigenschaften, wie z. B. Zusammensetzung, Anisotropie, Homogenität;
- der Geschwindigkeit, mit der die mechanische Belastung aufgebracht wird. Während die elastische Verformbarkeit oft kaum von der Belastungsgeschwindigkeit abhängt, steigt die Gesamtverformbarkeit meist mit der Belastungsgeschwindigkeit,
- der Temperatur: Das Verformungsverhalten und damit auch die Verformbarkeit hängt bei allen Materialien mehr oder weniger stark von der Temperatur ab. Dabei kann auch das Fehlen oder Auftreten viskoser Verformungsanteile temperaturabhängig sein.
-

Für kriechfähige Materialien, also solche, die auch viskose Verformungsanteile zeigen (z. B. plastische Tone), ist die Angabe einer maximal erreichbaren Verformung nur eingeschränkt möglich bzw. sinnvoll. Bei Einhaltung einer Stützdruck-abhängigen Obergrenze (Schädigungs-/Dilatanzgrenze) der aufgetragenen Scherspannung ist hier eine beliebig hohe Verformung erreichbar, ohne das Material zu schädigen - sofern man nur lange genug abwartet. Das Deformationsvermögen wird näherungsweise durch rheologische Materialmodelle und deren Kennwerte (wie z. B. Elastizitätsmodul, Schermodul, Querkontraktionszahl, Kohäsion, Winkel innerer Reibung, Fließgrenze, Dilatanzwinkel, Festigkeit, Viskosität) beschrieben.

Effektive Spannung

Das Prinzip der *effektiven Spannungen* geht zurück auf Terzaghi & Fröhlich (1936) und besagt, dass für die Festigkeit und die Formänderung eines Bodens/Gesteins nur die um den Porenwasserdruck verminderten totalen Spannungen von Bedeutung sind. Die effektive Spannung σ' ist die gedachte mittlere Korn-zu-Korn-Spannung und berechnet sich aus der totalen Spannung σ vermindert um den Porenwasserdruck p_w :

$\sigma' = \sigma - \alpha p_w$. Wobei α den Biot Koeffizienten darstellt, über den die Kompressibilität der Körner berücksichtigt wird.

Unter trockenen gasdruckfreien Bedingungen ($p_w = 0$) und nach Abschluss der Konsolidation oberhalb des Grundwasserspiegels entsprechen die effektiven Spannungen σ' den totalen Spannungen σ . Ggf. muss auch der Gasdruck in den Poren berücksichtigt werden, wofür verschiedene Ansätze existieren. Die SI-Einheit der effektiven Spannung ist Pa.

Topografie

Die *Topografie* beschreibt die Oberflächengestalt der Erdoberfläche.

Diskontinuitäten

Bei einer geologischen *Diskontinuität* handelt es sich um natürlich entstandene und mess-technisch feststellbare Trennfläche im Gestein. Dazu gehören Klüfte, an denen nur geringfügige Bewegungen stattgefunden haben, und Störungen, an der ursprünglich aneinander grenzende Gesteinspakete durch geologische Prozesse gegeneinander versetzt wurden (z. B. Aufwärts-, Abwärts- oder Horizontalbewegungen). Durch Diskontinuitäten entstandene Hohlräume werden mit der Eigenschaft Porosität beschrieben.

Risse

Risse sind feine, flächig oder kanalartig ausgebildete Trennflächen innerhalb von Bauwerken und technischen Bestandteilen oder der Auflockerungszone an der Kontur untertägiger Hohlräume. Sie können durch innere Spannungen, z. B. thermische Ausdehnung, oder durch äußere Krafteinwirkung erzeugt werden, wenn die Festigkeit des Materials überschritten wird. Durch Risse entstandene Hohlräume werden mit der Eigenschaft Porosität beschrieben.

Chemische/Mineralogische/Biologische Eigenschaften**Löslichkeitsprodukt**

Das *Löslichkeitsprodukt* charakterisiert das Gleichgewicht zwischen einem Feststoff und seinen Ionen in Lösung und ergibt sich als Produkt der Gleichgewichtsaktivitäten dieser gelösten Ionen. Es liegt eine ungesättigte Lösung vor, wenn das Aktivitätsprodukt der gelösten Ionen kleiner ist als das Löslichkeitsprodukt. Eine gesättigte Lösung liegt vor, wenn beide Werte gleich sind. Wird das Gleichgewicht durch Erhöhung der Konzentration eines der Ionen verändert und das Löslichkeitsprodukt überschritten, beginnt die Abscheidung eines Niederschlags, wobei die Konzentration beider Ionensorten sinkt bis sich das Gleichgewicht wieder eingestellt hat. Der Niederschlag kann wieder gelöst werden, wenn der Lösung Ionen entzogen werden und somit das Aktivitätsprodukt der gelösten Ionen gesenkt wird. Das Löslichkeitsprodukt ist ein Maß für die Löslichkeit einer bestimmten Verbindung. Ist das Löslichkeitsprodukt groß (klein) spricht man von einem leichtlöslichen (schwerlöslichen) Feststoff.

Stoffliche Zusammensetzung

Die *stoffliche Zusammensetzung* gibt die Mengen (Massen oder Teilchenzahlen) an Atomen, Ionen bzw. Molekülen verschiedener Identitäten innerhalb eines gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffes an. Im Fall von Feststoffen gibt sie zudem die Menge (Massen) an verschiedenen Mineralen an.

Radioaktivität

Die *Radioaktivität* gibt die Anzahl der Kernzerfälle pro Zeiteinheit innerhalb eines gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffes an.

Oberflächenbeschaffenheit

Die *Oberflächenbeschaffenheit* gibt neben dem Flächeninhalt (in m²) pro Einheitsmasse eines Feststoffes auch seine Oberflächenladung und Oberflächenrauheit sowie das Vorhandensein von Biofilmen oder anderer dünnen Schichten (z. B. Farbanstrich) an seiner Oberfläche an.

Mikrobenpopulation

Die *Mikrobenpopulation* gibt die Anzahl von Mikroben in einem Einheitsvolumen oder einer Einheitsmasse eines gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffes an.

2.3 Prozesse (Processes)

Ereignisse und Prozesse sind Vorgänge, die den Anfangszustand eines Endlagersystems, d. h. die Zustände mit den daran gekoppelten Eigenschaften verändern und die zukünftige Entwicklung beeinflussen. Im FEP-Katalog SÜD wird nun nicht mehr zwischen Ereignissen und Prozessen unterschieden. Die bisherige Aufteilung nach SKB (1989) in Ereignisse und Prozesse entfällt und alle Prozesse werden in gleicher Weise behandelt. Bisher wurde in Ereignisse (Events) unterschieden, die über einen sehr kleinen Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum ablaufen, d. h. kurzzeitige Phänomene sind, z. B. das FEP

Meteoriteneinschlag, und Prozesse (Processes), die über einen nennenswerten Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum ablaufen, d. h. lang andauernd sind, wie z. B. das FEP Spannungsfortpflanzung.

Die Gesamtmenge aller Prozess-FEP beschreibt alle im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems wesentlichen Prozesse schnittmengenfrei.

Die Prozesse sind unterteilt in

- Geologische Prozesse, die endogen oder exogen auf die Geosphäre und das darin enthaltene Grubengebäude einwirken, wie z. B. Erosion,
- Alterations-Prozesse wie z. B. Korrosionsprozesse. Da Alterationsprozesse auf unterschiedliche Materialien andere Auswirkungen haben, wird z. B. zwischen Korrosion der Brennstoffmatrix oder Korrosion von Zementphasen unterschieden,
- thermische, hydraulische und mechanische (THM) Prozesse wie z. B. das Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen oder Strömungsvorgänge und biologische Prozesse wie z. B. Mikrobielle Prozesse,
- sowie chemische und radiologische Prozesse wie z. B. der Radioaktive Zerfall und ionisierende Strahlung oder die Komplexbildung.

3 Anforderungen an den FEP-Katalog

Der FEP-Katalog soll in systematischer Form alle Informationen für eine Systemanalyse liefern, die notwendig sind, um die Sicherheit eines Endlagerstandortes in Tongestein zu beurteilen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden folgende Anforderungen an die Erstellung des FEP-Kataloges gestellt:

1. Der FEP-Katalog liefert eine wissenschaftliche Darstellung der Zustände, die den Ausgangszustand des Endlagersystems zu Beginn der Nachverschlussphase charakterisieren sowie der Prozesse, die in einem derartigen Endlagersystem zukünftig ablaufen können. Zugrunde gelegt werden das generische Endlagerstandortmodell SÜD (Reinhold et al. 2014, Jahn et al. 2015), die geowissenschaftliche Langzeitprognose (Stark 2014) und das Endlager- sowie das Verfüll- und Verschlusskonzept (Jobmann & Lommerzheim 2015).
2. Durch den FEP-Katalog werden grundlegende Informationen für die Szenarienentwicklung bereitgestellt. So werden im FEP-Katalog die direkten Abhängigkeiten zwischen den Zustands- und Prozess-FEP ausgewiesen (Kapitel 4.2).
3. Eine weitere Anforderung an den FEP-Katalog ist es, diejenigen FEP, die für die Systementwicklung nicht von Bedeutung sind, zu identifizieren und die Gründe für diese Einschätzung zu dokumentieren. Solche FEP können für die weitere Betrachtung im Rahmen der Szenarienentwicklung ausgeschlossen werden. Dafür werden Informationen zur jeweilig bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit benötigt. (FEP-Screening hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit, Kapitel 4.3)
4. Durch die systematische Zusammenstellung (inkl. zahlreicher Literaturhinweise) der relevanten Zustände, Ereignisse und Prozesse, die das Endlagersystem bestimmen, soll der FEP-Katalog einen Beitrag zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit leisten (Kapitel 4.5).
5. Des Weiteren soll der FEP-Katalog auch zur Identifizierung offener Fragen beitragen, die eine Endlagerung für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Tongestein betreffen (Kapitel 4.6).

Weitere Informationen zur Szenarienentwicklung, die bisher im FEP-Katalog bereitgestellt wurden (Zuweisung in Teilsysteme und Identifizierung von Initial-FEP), werden durch die geänderte Vorgehensweise nicht mehr im FEP-Katalog benötigt und auf andere Weise (Festlegung von Initial-Gruppen bei der Szenarienentwicklung) in die Systemanalyse integriert.

4 Vorgehensweise bei der Erstellung des FEP-Kataloges

Ausgangspunkt bei der Erstellung des FEP-Kataloges sind die in Kapitel 3 definierten Anforderungen. In den Kapiteln 4.1 bis 4.6 wird für jede dieser Anforderungen einzeln erläutert, wie sie bei der Umsetzung des FEP-Kataloges berücksichtigt wurde, d. h. welche Informationen der FEP-Katalog dafür bereitstellen muss.

4.1 Ausgangszustand des Endlagersystems

Um den Ausgangszustand in einem Endlagersystem darstellen zu können, werden folgende Informationen zu jedem FEP abgelegt:

- eine Definition bzw. Kurzbeschreibung (Kapitel 5.1),
- allgemeine Informationen und Beispiele (Kapitel 5.2),
- die Prozess oder Zustandsbeschreibung (Kapitel 0),
- mögliche zeitliche Beschränkungen des FEP (Kapitel 5.4) sowie die
- die relevanten Eigenschaften eines Zustands-FEP (Kapitel 5.6),
- Zusammenstellung relevanter Literaturhinweise (Kapitel 5.10).

Die Beschreibung der FEP bezieht sich räumlich auf das Endlagerstandortmodell SÜD. Weitere Angaben und Informationen, wie zum Beispiel überregional ablaufende Prozesse oder die Beschreibung der allgemeinen Geologie im Gebiet des Referenzprofils SÜD, sind in den dazugehörigen Berichten zum Endlagerstandortmodell (Reinhold et al. 2013, Jahn et al. 2015, Maßmann 2016) bzw. der geowissenschaftlichen Langzeitprognose (Stark 2014) ausgearbeitet. Des Weiteren fließen Informationen aus dem Endlagerkonzept und dem Verfüll- und Verschlusskonzept (Jobmann & Lommerzheim 2015) sowie dem Sicherheitskonzept und der Nachweisstrategie in den FEP-Katalog mit ein. Daher nimmt der vorliegende FEP-Katalog an vielen Stellen Bezug auf diese Berichte.

4.2 Abhängigkeiten zwischen den FEP

Für die Szenarienentwicklung werden grundlegende Informationen über die Abhängigkeiten zwischen den FEP benötigt, die für die Entwicklung des Endlagersystems zu berücksichtigen sind. Die Kenntnis von direkten Abhängigkeiten bildet eine wichtige Grundlage für die Identifizierung der Ausprägung der FEP.

Eine direkte Abhängigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das genannte FEP direkt auf das genannte andere FEP wirkt. So verändert sich beispielsweise das FEP *Lösungen im Grubengebäude* durch das FEP *Strömungsvorgänge* und es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen diesen beiden FEP.

Im ANSICHT-FEP-Katalog wird zwischen Zustands-FEP, die bestehende Bestandteile des Endlagersystems (Zustände) beschreiben und Prozess-FEP, die zu einer Veränderung eines Zustandes führen, unterschieden. Da in der Realität nur Prozesse auf einen Zustand einwirken und diesen Zustand verändern können oder ein Zustand von einem Prozess beeinflusst wird, wird die Festlegung getroffen, dass auch im FEP-Katalog Zustände nicht direkt auf Zustände wirken können, sondern immer ein Prozess dazwischen geschaltet ist, der den Zustand ändern kann. Ausnahmen, wie sie im FEP-Katalog NORD bei den Inventar-FEP auftreten, sind im FEP-Katalog SÜD nicht mehr erlaubt (siehe Regeln in Kapitel 2).

Dadurch erfolgt die Darstellung der Abhängigkeiten nun noch transparenter und nachvollziehbarer.

Die im FEP-Katalog beschriebenen relevanten Zustände und Prozesse (siehe FEP-Schema SÜD im Anhang A), die das Endlagersystem bestimmen, hängen in vielfältiger Weise voneinander ab und beeinflussen sich gegenseitig. Durch Wechselwirkungen mehrerer FEP können Wirkungsketten entstehen, in denen FEP über mehrere Schritte voneinander abhängen. Die Abb. 4.1 verdeutlicht die vielfältigen Wechselwirkung und Abhängigkeiten der Zustands- und Prozess-FEP zueinander.

Zusätzlich werden im FEP-Katalog SÜD die Eigenschaften eines Zustands-FEP angegeben, welche durch ein Prozess-FEP beeinflusst werden oder die Entwicklung eines Prozess-FEP beeinflussen. Somit kann eine präzisere Aussage gemacht werden, wie sich die Einwirkung oder Beeinflussung eines FEP auf ein anderes FEP auswirkt. Beispielsweise beeinflusst das FEP *Auflösung, Transformation und Neubildung von Tonmineralen* das FEP *Wirtsgestein*, indem sich u.a. die Eigenschaften Porosität, Permeabilität, Festigkeit, Stoffliche Zusammensetzung oder Diskontinuitäten ändern. So muss nun für jede Abhängigkeit zusätzlich in einem dafür vorgesehenen Textfeld angegeben werden, welche Eigenschaften durch ein FEP beeinflusst werden oder ein FEP beeinflussen und in einer kurzen Begründung dokumentiert werden.

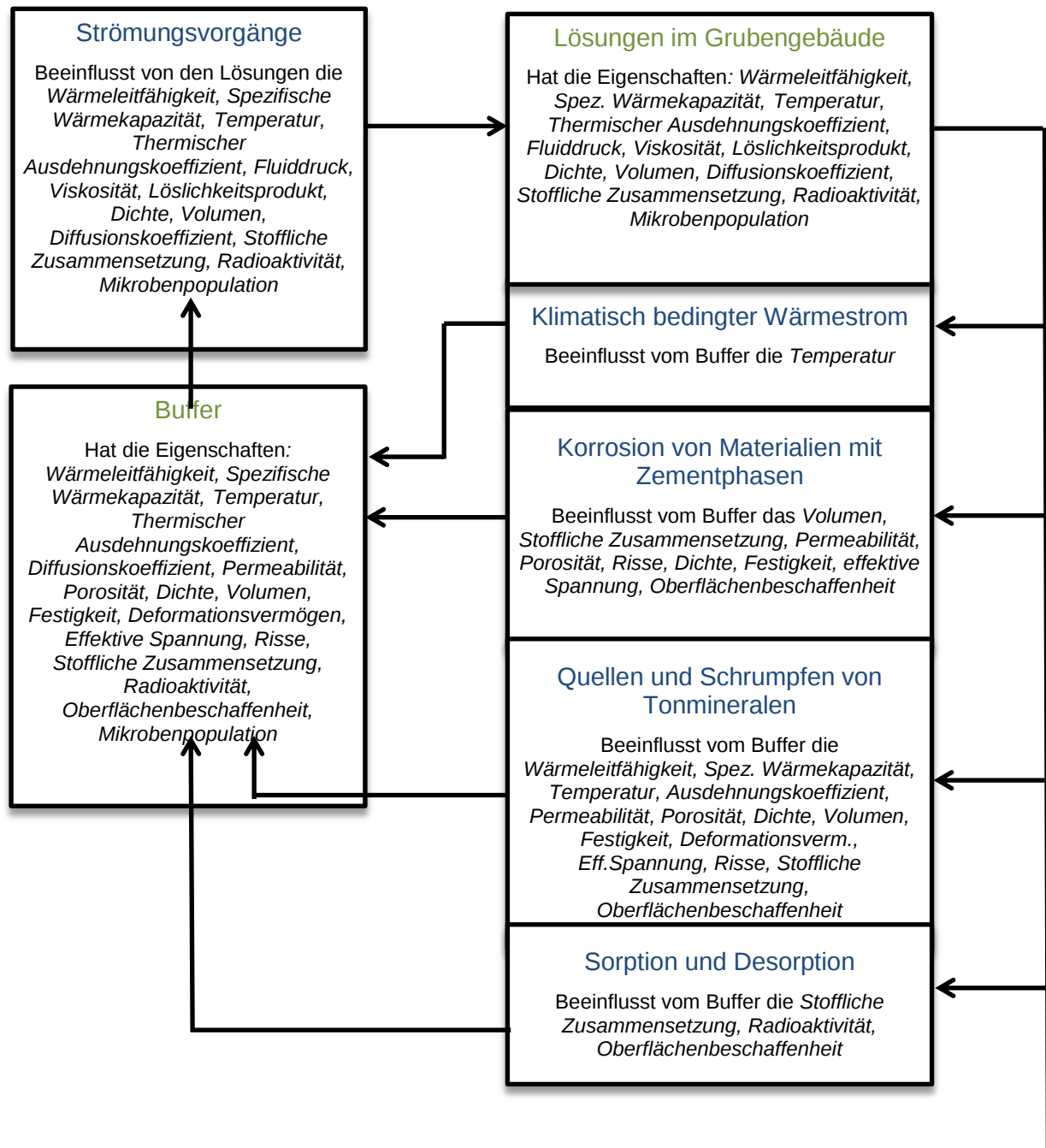


Abb. 4.1: Übersichtsdiagramm über einige FEP-Wechselwirkungen in Tongestein. Zustands-FEP mit Eigenschaften in grün und Prozess-FEP mit den beeinflussten Eigenschaften des jeweiligen Zustands-FEP in blau

Um die Abhängigkeiten darzustellen, werden zu jedem FEP die einwirkenden und beeinflussten FEP beschrieben:

- Einwirkende FEP beschreiben diejenigen FEP, die Einfluss auf das betrachtete FEP haben und damit seine Ausprägung verändern können.
- Beeinflussten FEP beschreiben diejenigen FEP, auf die das jeweilige FEP Einfluss nehmen und damit seine Ausprägung verändern können.

Da die direkten Abhängigkeiten zwischen den FEP die Ableitung der Ausprägung ermöglichen, haben sie einen entscheidenden Einfluss auf die Szenarienentwicklung und sind in der Datenbank begründet. In einem dafür vorgesehenen Textfeld wird zu jeder Abhängigkeit angegeben, warum die Abhängigkeit besteht.

Um den Informationsgehalt zu erhöhen, werden nun auch 'Nicht-Begründungen' angegeben, d. h. es wird dokumentiert, aus welchem Grund ein FEP nicht auf ein anderes FEP wirkt oder dieses beeinflusst. Beispielsweise wirkt das FEP *Erosion* nicht auf das FEP *Wirtsgestein*, da der Prozess nur an der Erdoberfläche wirkt und somit keine Eigenschaften des Wirtsgesteins verändert.

4.3 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

Ein für die Szenarienentwicklung erforderlicher Schritt ist die Identifizierung von Prozessen (Prozess-FEP), die bei der Szenarienentwicklung unberücksichtigt bleiben können. Damit kann die Anzahl der in der Szenarienentwicklung zu berücksichtigenden FEP eingeschränkt werden. Dieser Arbeitsschritt wird als FEP-Screening bezeichnet.

Der FEP-Katalog macht eine qualitative Aussage zur bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit, d. h. mit welcher Wahrscheinlichkeit die Voraussetzungen für das Eintreten eines FEP am Endlagerstandortmodell erfüllt sind. So bildet die Anwesenheit von Lösungen eine wichtige Voraussetzung für die Korrosion von Metallen. Wenn es zu einem Kontakt von Metallen mit Wasser kommt, laufen Korrosionsprozesse ab. Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit des FEP *Metallkorrosion* ist wahrscheinlich, unabhängig davon, ob es bei einem bestimmten Szenarium tatsächlich zu einem Kontakt von Lösungen mit Metallen im Endlager kommt. Ob und in welchem Umfang Metallkorrosion im Endlager auftritt, beispielsweise durch Wasserezutritte, wird erst im Rahmen der Systemanalyse ermittelt. Die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit ist trotz begrifflicher Nähe nicht gleichzusetzen mit den Wahrscheinlichkeitsklassen („wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ oder „unwahrscheinlich“), die in BMU (2010) festgelegt sind. Bei der Zuordnung der FEP zu diesen Wahrscheinlichkeitsklassen nach BMU (2010) wird in der Szenarienentwicklung zusätzlich die Ausprägung des FEP verwendet.

Die Ausprägung sagt aus, in welcher Intensität das jeweilige FEP auftritt. Dabei kann es sich um eine qualitative Beschreibung oder um einen quantitativen Wert bzw. Wertebereich handeln. FEP können verschiedene Ausprägungen aufweisen, die den Wahrscheinlichkeitsklassen „wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ bzw. „unwahrscheinlich“, zugeordnet werden können oder die sich aus der jeweils betrachteten Systementwicklung ergeben. Die im FEP-Katalog NORD gebräuchliche Bezeichnung „nicht zu betrachten“ wird aufgrund der nicht eindeutigen Bezeichnung in „unwahrscheinlich“ geändert.

- Wenn möglich, sind im FEP-Katalog Ausprägungen in Verbindung mit Angaben zu ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit aufgeführt (z. B. Ausfallraten von Behältern mit unerkannten Defekten).

- Bei manchen FEP kann eine Ausprägung angegeben werden, eine Zuordnung zu einer Wahrscheinlichkeitsklasse ist aber nicht möglich. Dies hängt oft damit zusammen, dass die Datenlage für eine solche Zuordnung nicht ausreicht. In diesen Fällen wird für das FEP im Referenzszenarium eine repräsentative Ausprägung angegeben und somit eine qualitative Abschätzung gemacht.
- Bei manchen FEP hängt deren Ausprägung von der jeweils betrachteten Entwicklungsmöglichkeit des Endlagersystems ab. Für solche FEP kann daher a priori keine wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche oder unwahrscheinliche Ausprägung identifiziert werden. Die Ausprägung solcher FEP und die Wahrscheinlichkeit dieser Ausprägung ergeben sich durch die Beeinflussung über andere, kausal mit ihnen verbundene FEP und müssen unter den jeweiligen Bedingungen des Szenariums erst ermittelt werden. Die tatsächliche Ausprägung bei einer betrachteten Systementwicklungsmöglichkeit kann vorab mittels Modellrechnungen oder durch Expertenurteil mit entsprechender Begründung abgeschätzt oder erst im Rahmen der Konsequenzenanalyse für das Szenarium ermittelt werden.

Wie aus der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit der FEP und ihrer Ausprägung die Zuordnung zu den Wahrscheinlichkeitsklassen nach BMU (2010) erfolgt, ist in Tab. 4.1 zusammengestellt. Die Bewertung der Ausprägung wird für alle FEP, die Teil der Initial-Gruppen sind, abgeleitet.

Tab. 4.1: Ableitung von Wahrscheinlichkeitsklassen aus den Informationen im FEP-Katalog zur bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit und der Ausprägung

FEP-Katalog				Wahrscheinlichkeitsklassen	
bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit		Ausprägung			
wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich
x		x		x	
x			x		x
	x	x			x

Ein für die Szenarienentwicklung erforderlicher Schritt ist die Identifizierung von FEP, die bei der Szenarienentwicklung unberücksichtigt bleiben können. Dieser Arbeitsschritt wird als FEP-Screening bezeichnet. Tritt der Fall ein, dass ein Eintreten eines FEP ausgeschlossen werden kann, ist eine entsprechende stichhaltige Begründung anzugeben. Wird das Eintreten eines FEP ausgeschlossen, hat dies auch Konsequenzen für die weitere Handhabung innerhalb der Systemanalyse. Abhängigkeiten zwischen den FEP (siehe Kapitel 4.3) brauchen in diesem Fall nicht berücksichtigt werden.

Im FEP-Katalog SÜD treten bei der Identifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit zwei Sonderfälle auf, diese werden im nächsten Abschnitt genauer erläutert:

Das FEP *Meteoriteneinschlag* wird zwar als wahrscheinliches FEP eingestuft, weist aber keine Abhängigkeiten auf, da ein direkter Einschlag eines sehr großen Meteorits im Bereich des Endlagerlagerstandortmodells Folgen nach sich ziehen wird, die die einer Freisetzung

von Radionukliden aus einem Endlager bei Weitem übertreffen, somit ist die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit nicht zu betrachten.

Das FEP *Vertikale Bewegungen der Erdkruste* weist ebenfalls keine Abhängigkeiten zu anderen FEP auf, da Vertikale Bewegungen der Erdkruste auch innerhalb der nächsten eine Million Jahre ablaufen werden, durch die langsamen, großflächigen und sich über lange Zeiträume erstreckenden Hebungen sich aber keine relativen Auswirkungen auf die Geosphäre und das Grubengebäude ergeben werden. Somit wird die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit auf „nicht zu betrachten“ gesetzt (keine relativen Auswirkungen auf die Geosphäre).

Im FEP-Katalog NORD konnten FEP, deren Eintreten über die Eintrittswahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden konnte, bei der Szenarienentwicklung übergangen werden, genauso wie FEP, deren Wirkung in den dort definierten vier Teilsystemen mit „nicht zu berücksichtigen“ angegeben ist. Da im FEP-Katalog SÜD keine vier Teilsysteme des Endlagersystems mehr unterschieden werden, entfällt die Zuweisung der FEP in die jeweiligen Teilsysteme. Die Tatsache, dass bestimmte FEP nur in den unterschiedlichen Bereichen des Endlagersystems in verschiedener Ausprägung relevant sein können, wird erst im nächsten Schritt im Zuge der Szenarienentwicklung analysiert. Dort wird die Wirkung in den unterschiedlichen FEP-Gruppen geprüft.

4.4 Ansatzpunkte für die Szenarienentwicklung

Aufgrund der geänderten Methodik im FEP-Katalog ist nun auch eine andere Vorgehensweise bei der Szenarienentwicklung erforderlich. Ein erster Ansatz wird in diesem Kapitel vorgestellt.

Durch die Informationen zur Eintrittswahrscheinlichkeit kann die Anzahl der in der Szenarienentwicklung zu berücksichtigenden FEP eingeschränkt werden. Trotzdem verbleibt eine große Anzahl zu berücksichtigenden FEP, die z. T. Aspekte beschreiben, die für die Sicherheitsbewertung von untergeordneter Bedeutung sind. Da die Sicherheitsbewertung auf der Funktion der Bestandteile des Barrierensystems fußt, wurde in der bisherigen Vorgehensweise als weiteres Selektionskriterium FEP mit einer direkten Beeinträchtigung der Initial-Barrieren (Initial-FEP) identifiziert (vgl. Beuth et al. 2012). Somit konnte die Anzahl der FEP, die die Ausgangspunkte für die Szenarienentwicklung bilden, auf eine handhabbare Anzahl reduziert werden.

Nun wird dieser Schritt auf einem anderen Weg als bisher durchgeführt. Es erfolgt eine Auswahl von FEP-Gruppen, um für die gewählte methodische Vorgehensweise die Ansatzpunkte identifizieren zu können. Die Zusammensetzung der Gruppen basiert auf dem Konzept, das manche Zustände des Endlagersystems ein gemeinsames System bilden und aneinander angrenzen (z. B. Verschlussbauwerke mit ihrer Auflockerungszone). Ebenso können Zustände, die in einem engen Zusammenhang stehen, aber aufgrund der methodischen Trennung in den Kategorien fest, flüssig, gasförmig beschrieben werden (z. B. das FEP *Wirtsgestein, Lösungen im Wirtsgestein* und *Gase im Wirtsgestein*), in einer Gruppe zusammengefasst werden.

Weiterhin werden die Barrieren betrachtet, die einerseits einen Lösungszutritt zu den Einlagerungsbereichen verzögern und andererseits eine Freisetzung ggf. kontaminierter Lösungen aus den Einlagerungsbereichen in das Grubengebäude begrenzen. Durch das Sorptionsvermögen der Tongesteine werden zudem Radionuklide zurückgehalten. Die diesbezügliche Barrierenwirksamkeit der genannten Barrieren ist zu Beginn der Nachverschlussphase vollständig entwickelt.

Zusätzlich werden in den Gruppen weitere Barrieren betrachtet, da sie zum sicheren Einschluss der Radionuklide beitragen, indem sie zu einem späteren Zeitpunkt zur Wiederherstellung der geringen Permeabilität im Endlagersystem beitragen (z. B. Versatz) oder eine Freisetzung der Radionuklide verzögern (z. B. Abfallmatrix).

Voraussetzung für die geänderte Vorgehensweise in der Szenarienentwicklung ist, dass das Zusammenspiel der Barrieren und ihrer Wirksamkeit sowie eine mögliche Beeinträchtigung ihrer Funktion durch im Endlagersystem ablaufende Prozesse weiterhin durch entsprechende FEP und ihre Ausprägungen im Rahmen der Szenarienentwicklung erfasst werden kann.

4.5 Transparenz und Nachvollziehbarkeit

Durch den Aufbau des FEP-Kataloges werden der Ausgangszustand des Endlagersystems und Prozesse, die in einem derartigen Endlagersystem zukünftig ablaufen, in systematischer Weise erfasst. Die Beschreibung der einzelnen FEP erfolgt derart, dass die für die weitere Verwendung der FEP in der Szenarienentwicklung erforderlichen Informationen in übersichtlicher Weise angeordnet sind. Die Gewährleistung der Verfahrenstransparenz im FEP-Katalog ist durch die Begründungen der Abhängigkeiten untereinander und der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit gegeben (Kapitel 4.2 und 4.3).

Von besonderer Bedeutung für die Transparenz und Nachvollziehbarkeit des FEP-Kataloges ist die Zusammenstellung von Literaturhinweisen zu den FEP. Sie ist ein wesentlicher Bestandteil der wissenschaftlichen Beschreibung und Dokumentation des Zustandes des Endlagersystems am generischen Endlagerstandortmodell und Prozesse in einem derartigen Endlagersystem. Dadurch kann gezeigt werden, welche wissenschaftlichen Beiträge berücksichtigt worden sind und welche letztendlich bei der Beschreibung der Auswirkungen eines FEP zugrunde gelegt wurden. Die angegebenen und diskutierten Literaturhinweise geben naturgemäß immer nur einen Ausschnitt der tatsächlich vorhandenen Literatur wieder. Durch die Dokumentation im FEP-Katalog sind aber die verwendeten Grundlagen transparent und nachvollziehbar dargelegt.

4.6 Identifizierung offener Fragen

Bei der Bearbeitung der FEP haben sich Aspekte ergeben, die im Detail noch besser untersucht werden sollten. Die Identifizierung dieser offenen Fragen im FEP-Katalog liefert einen Beitrag zur Feststellung allgemeiner Fragestellungen bezüglich der Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Tongestein sowie des zukünftigen Bedarf an Forschung und Entwicklung.

5 Aufbau der FEP-Einträge

In diesem Kapitel werden sowohl Aufbau der Datenbank als auch die Struktur des beigelegten Auszugs erläutert. Aufgrund der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen vielfältigen Anforderungen an den FEP-Katalog werden folgende Informationen zu jedem FEP bereitgestellt:

- FEP-Titel
- Auswahl Zustand/Prozess
- eine Definition bzw. Kurzbeschreibung,
- allgemeine Informationen und Beispiele,
- die Zustands- oder Prozessbeschreibung,
- die Eigenschaften eines Zustandes,
- mögliche zeitliche Beschränkungen des FEP,
- die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit mit Begründung,
- die direkten Abhängigkeiten zu anderen FEP mit Begründungen
- offene Fragen und
- Literaturquellen.

Im Vergleich zum FEP-Katalog NORD werden die FEP nun nicht mehr einzelnen Teilsystemen zugewiesen und auch keine Initial-FEP charakterisiert. Diese Informationen werden für die Szenarienentwicklung zukünftig in anderer Weise berücksichtigt (siehe Kapitel 4.4). Alle Informationen zu den FEP sind in einer Datenbank abgelegt. Ein Auszug der Datenbank (Stand März 2016) ist auf einer CD-ROM diesem Bericht beigelegt. Die Datenbank verfügt über eine graphische Benutzeroberfläche, die die Möglichkeit bietet,

- Datensätze zu erstellen, zu bearbeiten und zu löschen,
- verschiedene Versionen von Datensätzen zu verwalten,
- einen Konsistenzcheck zwischen den Abhängigkeiten der FEP durchzuführen,
- eine Suchfunktion mit verschiedenen Suchkriterien zu starten und entsprechende Listen zu erstellen sowie
- Datensätze bzw. Datenlisten zu exportieren und zu drucken.

Abfragen: sortiert nach fepnr

FEP-Nr.: AS 1.8.0.0 Titel: Wirtsgestein Datum: 27.10.2015 Status: Zustand Rev.-Nr.: 0.026

Kurzbeschreibung:
Das Wirtsgestein ist der Teil einer Gesteinsabfolge, in dem die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Das FEP beschreibt die strukturellen, lithologischen, mineralogischen und petrophysikalischen Eigenschaften des Wirtsgesteins.

NEA Gruppe:

- ☐ 1.2.1 Tektonische Bewegungen
- ☐ 1.2.2 Orogenese
- ☐ 1.2.3 Plastische, elastische oder Bruchdeformation
- ☐ 1.2.4 Seismizität
- ☐ 1.2.5 Vulkanismus und magmatische Aktivitäten
- ☐ 1.2.6 Metamorphose
- ☐ 1.2.7 Hydrothermale Aktivität
- ☐ 1.2.8 Regionale Erosion und Sedimentation
- ☐ 1.2.9 Diagenese
- ☐ 1.2.10 Pedogenese
- ☐ 1.2.11 Salzdiapirismus und Lösung
- ☐ 1.3.1 Globale Klimaänderungen
- ☐ 1.3.3 Meeresspiegeländerungen
- ☐ 1.3.4 Periglaziale Effekte

Eigenschaftsliste der Zustände:

- ☒ Wärmeleitfähigkeit
- ☒ Spezifische Wärmekapazität
- ☒ Temperatur
- ☒ Thermische Ausdehnungskoeffizienten
- ☒ Diffusionskoeffizient
- ☐ Viskosität
- ☒ Permeabilität
- ☒ Porosität
- ☒ Diskontinuitäten
- ☐ Risse
- ☐ Kompressibilität
- ☐ Fluiddruck
- ☒ Dichte
- ☒ Volumen
- ☒ Festigkeit
- ☒ Deformationsvermögen
- ☒ Effektive Spannung
- ☐ Topographie
- ☒ Löslichkeit
- ☒ Stoffliche Zusammensetzung
- ☒ Radioaktivität
- ☒ Oberflächenbeschaffenheit
- ☒ Mikrobenpopulation

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit:

- ☒ wahrscheinlich
- ☐ weniger wahrscheinlich
- ☐ nicht zu betrachten

Begründungen:
Das Wirtsgestein ist eine Randbedingung des Endlagerstandortmodells und wird auch in Zukunft als Randbedingung Bestand haben.

Allgemeine Informationen | Zustands- / Prozessbeschreibung | Einwirkende FEP | Beeinflusste FEP | Zeitliche Beschränkungen | Literatur / Fragen | Revision

Allgemeine Informationen und Beispiele:

Weltweit werden verschiedene Arten von Wirtsgesteinen mit zum Teil deutlichen Unterschieden in ihren charakteristischen – insbesondere mechanischen und hydraulischen – Eigenschaften (z. B. der Festigkeit und Permeabilität) untersucht. Dabei spielen, den nationalen geologischen Gegebenheiten folgend, in vielen Ländern Tongesteine eine wesentliche Rolle. Deshalb werden derzeit – in Abhängigkeit von natürlichen geologischen Bedingungen – als potentielle Wirtsgesteine sowohl Tone (z. B. Boom Clay, Mol, Belgien) als auch Tonsteine untersucht. Zu letzteren zählen der Opalinuston (untersucht z. B. in der Sondierbohrung Benken im Zürcher Weinland und im Felslabor Mont Terri im Faltenjura, beide Schweiz, vgl. dazu NAGRA 2002) sowie die Tongesteine des Callovium-Oxfordium (untersucht im Untertagelabor Meuse/Haute-Marne am Standort Bure, Frankreich, vgl. dazu ANDRA 2005a). Im Felslabor Mont Terri lassen sich im Opalinuston drei verschiedene Faziesausbildungen (tonige, sandige und tonig-kalkige Fazies) unterscheiden, wobei die sandige Fazies ähnliche Festigkeitseigenschaften aufweist wie die die Tonsteine des Callovium-Oxfordium am Standort Bure/Frankreich.

Im Projekt AnSichT wird im Referenzprofil SÜD (Reinhold & Sönke 2012) das Tongestein des Opalinuston als Wirtsgestein betrachtet. In Südwestdeutschland erreicht die Opalinuston-Formation Maximalmächtigkeiten von 150 m. Der untere Teil dieser Formation besteht zumeist aus leicht schluffigen Tonsteinen mit ausgeprägtem schiefrigem Setzungsgefüge. Diese Tonsteine besitzen im größten Teil des Verbreitungsgebietes eine fast gleichbleibende Mächtigkeit von 90 bis 100 m; sie werden als Teufelsloch-Subformation von der hangenden, stärker sandigen Zillhausen-Subformation abgegrenzt (Franz & Nitsch 2009). Die Tonsteine der Teufelsloch-Subformation lassen sich in sedimentpetrographischer und mineralogischer Hinsicht am besten mit den Sedimenten der tonigen Fazies des Opalinustons von Mont Terri vergleichen.

Die geologischen Verhältnisse des Referenzprofils SÜD (Reinhold & Sönke 2012) gleichen denen im westlichen Molassebecken, nahe dem nordwestlichen Beckenrand. Es wird erwartet, dass die für das gesamte Molassebecken typischen, etwa alpenparallel verlaufenden syn- und antithetischen Abschiebungen (Geyer et al. 2011) vereinzelt auch im Endlagerstandortmodell SÜD vorkommen, diese jedoch nur einen geringen vertikalen Versatz aufweisen (maximal wenige Meter). Großräumigen Störungszonen treten im Gebiet des Referenzprofils SÜD nicht auf.

Gegenwärtig werden für das Gebiet des Referenzprofils SÜD nur sehr geringe tektonische Bewegungen angenommen. Hinweise ergeben sich aus der nur geringen Seismizität in den Gebieten mit untersuchungswürdigen Tongesteinen, die nach Hoth et al. (2007) in der Erdbebenzone 1 und kleiner liegen.

Abb. 5.1: Grafische Benutzeroberfläche der ANSICHT-FEP-Datenbank am Beispiel des FEP Nr. 1.8. 0.0 „Wirtsgestein“

Die grafische Benutzeroberfläche (Abb. 5.1) ist geteilt in einen Kopf und sieben Registerkarten, auf denen die längeren Texte zur inhaltlichen Beschreibung eingetragen sind. Zunächst werden einige allgemeine Angaben im Kopf der Benutzeroberfläche erklärt, bevor detailliert auf die in der Datenbank abzulegenden Informationen eingegangen wird.

Die FEP-Bezeichnung setzt sich aus der FEP-Nummer, dem FEP-Titel und dem Status des FEP zusammen.

- **FEP-Nummer:** Die FEP-Nummer ermöglicht eine eindeutige Kennzeichnung des FEP. Die frühere FEP-Nummer, die sich auch aus der NEA-Nummer zusammengesetzt hat, wird zur besseren Übersicht durch eine fortlaufende Nummerierung gemäß der FEP-Liste SÜD ersetzt.
- **FEP-Titel:** Zusätzlich zur FEP-Nummer, mit der jedes FEP eindeutig identifiziert ist, wird für jedes FEP ein aussagekräftiger FEP-Titel vergeben. Beim Benennen der FEP wurden folgende Regeln zugrunde gelegt:

Werden in einem FEP sich ausschließende Prozesse zusammengefasst, werden sie mit einem „oder“ versehen, Beispiel: *Transgression oder Regression*

Werden in einem FEP gleichzeitig ablaufende Prozesse zusammengefasst, werden sie mit einem „und“ versehen, Beispiel: *Auflösung, Transformation und Neubildung von Tonmineralen*

- **FEP-Status:** Einteilung in einen Zustand oder einen Prozess. Dadurch ändert sich die Benutzeroberfläche, da nur Zustands-FEP in ein dafür vorgesehenes Feld Eigenschaften zugewiesen bekommen.
- **NEA Gruppe:** Um weiterhin den Bezug des betreffenden FEP zum FEP-Schema der NEA transparent zu machen, wird, anstatt die dreigliedrige NEA-Nummer zu verwenden, das FEP nun direkt in das FEP-Schema der NEA eingeordnet.

Die Aufteilung in die folgenden neun Unterkapiteln (Kapitel 5.1 bis 5.9) entspricht der Untergliederung der FEP-Beschreibung des technischen Berichtes, der einen Auszug aus der Datenbank (Stand März 2016) darstellt. In den Unterkapiteln ist angegeben, was in die Datenbank zu jedem Aspekt jeweils eingegeben werden kann.

5.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses Feld beinhaltet die Definition des FEP und gegebenenfalls eine kurze Beschreibung. Dadurch wird das FEP gegenüber möglicherweise differierenden Bedeutungen in anderen Fachgebieten sowie Mehrdeutigkeiten abgegrenzt.

5.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Ausgehend von der Kurzbeschreibung (Kapitel 5.1) kann in diesem Textfeld die Bedeutung des FEP durch zusätzliche Informationen und Beispiele näher erläutert werden. Diese Informationen sind nicht spezifisch für das Endlagerstandortmodell, hier können z. B. auch relevante Informationen aus dem Gebiet des Referenzprofils SÜD oder Informationen, die generell für den jeweiligen Prozess/Zustand gelten, dargelegt werden.

5.3 Prozess oder Zustandsbeschreibung

Für die durch das jeweilige FEP beschriebene Gegebenheit ist in diesem Feld die Sachlage am Endlagerstandortmodell angegeben. Die Darstellung beschränkt sich nicht nur auf das derzeitige oder frühere Eintreten bzw. die Ausprägung des FEP am Endlagerstandortmodell, sondern umfasst auch die Möglichkeit des Eintretens bzw. der Ausprägung des FEP in der Zukunft. Die Beschreibung des Endlagerstandortmodells SÜD erfolgt in Reinhold et al. (2015).

5.4 Eigenschaftsliste der Zustände

Für jedes Zustands-FEP werden die relevanten Eigenschaften ausgewählt (Abb. 5.2). Die Eigenschaften gliedern sich in die vier verschiedenen Prozessklassen thermische Eigenschaften, hydraulische Eigenschaften, mechanische Eigenschaften und Chemische/Mineralogische/Biologische Eigenschaften (siehe Kapitel 2.2).

5.5 Zeitliche Beschränkung

Verschiedene FEP können nur in bestimmten Zeiträumen auftreten bzw. wirksam werden. Sofern solche zeitlichen Beschränkungen bestehen, sind sie unter der Registerkarte „Zeitliche Beschränkung“ (Abb. 5.1) angegeben.

Bei der Verknüpfung von FEP zu Szenarien können dann Kombinationen von FEP, die im Prinzip voneinander abhängig sind, aber im konkreten Fall nur in unterschiedlichen Zeiträumen wirksam werden können, unberücksichtigt bleiben.

Wenn das FEP über den gesamten Nachweiszeitraum auftreten kann oder anderweitig keine zeitlichen Einschränkungen möglich sind, wird dies durch den Eintrag „keine“ dokumentiert.

5.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit

Mit Hilfe eines Auswahlfeldes erfolgt eine Klassifizierung der Wahrscheinlichkeit, mit der ein FEP unter der Bedingung eintritt, dass die für sein Eintreten notwendigen Voraussetzungen am Standort vorliegen bzw. mit Sicherheit zu erwarten sind. In der FEP-Datenbank wird über eine Schaltfläche zwischen folgenden Optionen unterschieden:

- wahrscheinlich: Das Eintreten von FEP dieser Klasse innerhalb des Nachweiszeitraums ist zu erwarten. In diese Klasse fallen auch am Endlagerstandortmodell vorliegende Gegebenheiten, die z. B. die geologische Situation beschreiben (z. B. das FEP *Wirtsgestein*) oder durch die Einlagerung der radioaktiven Abfälle gegeben sind (z. B. das FEP *Abfallmatrix*).
- weniger wahrscheinlich: Das Eintreten von FEP dieser Klasse innerhalb des Nachweiszeitraums ist nicht zu erwarten, aber auch nicht auszuschließen.
- unwahrscheinlich: Diese Klasse wird gewählt, wenn das FEP am Endlagerstandortmodell innerhalb des Nachweiszeitraumes nicht eintreten kann. Dies trifft zum Beispiel auf das FEP *Orogenese* zu.

Da es eine wichtige Aufgabe des FEP-Kataloges ist, die wissenschaftlichen Sichtweisen und die darauf basierenden getroffenen Entscheidungen transparent und nachvollziehbar zu machen, sind in einem Textfeld auch die Begründungen zur Bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit dokumentiert.

5.7 Direkte Abhängigkeiten und Begründung der Abhängigkeiten

Es werden die direkten Abhängigkeiten zwischen FEP aufgezeigt, die für die Langzeitsicherheitsanalyse von Bedeutung sind. Die Kenntnis derartiger Abhängigkeiten bildet eine wichtige Grundlage für die Identifizierung der Ausprägungen der FEP und spielt damit für die Szenarienentwicklung eine große Rolle. Eine direkte Abhängigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das genannte FEP direkt auf das genannte andere FEP wirkt (siehe Kapitel 4.2.).

Auch für die direkten Abhängigkeiten sind in einem Feld die Begründungen zu den Einträgen dokumentiert.

Es gibt jeweils eine Registerkarte für die Einwirkenden FEP und eine Registerkarte für die Beeinflussten FEP. Diese Registerkarte gliedert sich in jeweils vier Felder, in diesen ist enthalten

- Einwirkende FEP bzw. Beeinflusste FEP: In diesem Feld werden die einwirkenden oder beeinflusste FEP mit FEP-Nummer und Name dargestellt. Die FEP können aus einer Liste ausgewählt werden, die je nach Zustand oder Prozess entweder nur die Prozesse oder die Zustände anzeigt.
- Nicht einwirkende bzw. Beeinflusste FEP: Hier werden die FEP ohne direkte Abhängigkeit aufgeführt. Diese Liste ergibt sich automatisch über die in den Einwirkende FEP bzw. Beeinflusste FEP nicht aufgeführten Zuständen bzw. Prozessen.
- Eigenschaftsliste: in diesem Feld werden die jeweils einwirkenden oder beeinflussten Eigenschaften des selektierten Einwirkenden bzw. Beeinflussten FEP dargestellt.
- Begründungen der FEP-Abhängigkeiten: hier wird jeweils die positive oder negative Begründung der Abhängigkeiten der davor angekreuzten Eigenschaften aus der Eigenschaftsliste aufgeführt.

The screenshot displays the ANSICHTT-FEP-Datenbank interface with the following sections:

- Einwirkende FEP:** A list of FEPs including 3.3.0.0 Klimatisch bedingter Wärmestrom, 3.9.0.0 Korrosion der Brennstoffmatrix, 4.0.0.0 Alteration von Glas, 4.2.0.0 Metallkorrosion, 4.3.0.0 Metallversprödung durch Wasserdampf, 4.4.0.0 Metallversprödung durch Strahlung, and 4.7.0.0 Chemische Alteration von Organismen.
- Nicht einwirkende FEP:** A list of FEPs including 2.5.0.0 Vertikale Bewegungen der Erdkruste, 2.6.0.0 Orogenese, 2.7.0.0 Krustendeformation, 2.8.0.0 Grabenbildung, 2.9.0.0 Magmatismus und hydrothermale Aktivität, 3.0.0.0 Gesteinsmetamorphose, 3.1.0.0 Erosion, 3.2.0.0 Sedimentation, 3.4.0.0 Niederschlagseintrag, 3.5.0.0 Transgression oder Regression, 3.6.0.0 Vorlandvereisung, 3.7.0.0 Glaziale Rinnenbildung, 3.8.0.0 Meteoriteneinschlag, and 4.1.0.0 Korrosion von Zementphasen.
- Eigenschaftsliste:** A list of properties with checkboxes, including Wärmeleitfähigkeit, Spezifische Wärmekapazität, Temperatur (checked), Thermische Ausdehnungskoeffizient, Permeabilität, Porosität, Risse, Dichte, Volumen, Festigkeit, Deformationsvermögen, Effektive Spannung, Stoffliche Zusammensetzung, Radioaktivität, Oberflächenbeschaffenheit, and Mikrobenpopulation.
- Begründungen FEP Abhängigkeiten:** A text box containing the justification: "- Temperatur: Klimatisch bedingter Wärmestrom kann Temperatur der Abfallmatrix ändern."

Abb. 5.2: Ausschnitt der Registerkarte der ANSICHTT-FEP-Datenbank am Beispiel des FEP Nr. 1.0. 0.0 „Abfallmatrix“ mit den vier Feldern der FEP-Abhängigkeiten (Einwirkende FEP und nicht einwirkende FEP), Eigenschaftsliste sowie Begründungen der FEP-Abhängigkeiten.

5.8 Konsistenzcheck

Die Tatsache, dass zwischen den Einwirkenden FEP und den Beeinflussten FEP eine Wechselbeziehung besteht (z. B. Lösungen im Grubengebäude ist einwirkendes FEP von Metallkorrosion <> Metallkorrosion ist beeinflusstes FEP von Lösungen im Grubengebäude), wird in der Datenbank zur Qualitätssicherung genutzt. Dafür kann innerhalb der Datenbank ein Konsistenzcheck zwischen den Einträgen von Einwirkenden FEP zu Beeinflussten FEP durchgeführt werden, der vorhandene Inkonsistenzen ausgibt. Diese Prüfung ist nützlich, da solche Inkonsistenzen bei der Bearbeitung anzeigen, dass die Abhängigkeiten zwischen zwei FEP aus der Perspektive des einen FEP anders beurteilt werden als aus der Perspektive des anderen. Diese abweichenden Bewertungen würden in der Szenarienentwicklung für die gleiche Wechselwirkung zu unterschiedlichen Systementwicklungen führen, weshalb solche Inkonsistenzen im FEP-Katalog eindeutig aufgelöst werden müssen.

Praktisch heißt das, dass z. B. im FEP Metallkorrosion die Lösungen im Grubengebäude als Einwirkendes FEP angegeben sind umgekehrt im FEP Lösungen im Grubengebäude die Metallkorrosion jedoch nicht bei den Beeinflussten FEP auftaucht. Der Konsistenzcheck gibt diese Abweichungen als Liste aus. Zur Bereinigung dieser Inkonsistenzen werden die Begründungen der Abhängigkeit oder des Ausschlusses auf beiden Seiten geprüft und diskutiert und schließlich die einheitliche Festlegung in beiden FEP umgesetzt.

Durch die Erweiterung der Zustände um Eigenschaften im FEP-Katalog Süd muss diese wechselseitige Beziehung zusätzlich auch für jede in der Verknüpfung genannte beeinflusste bzw. einwirkende Eigenschaft gelten. Dieser erweiterte Konsistenzcheck konnte im innerhalb der bisher genutzten Datenbank technisch nicht umgesetzt werden. Stattdessen wurde dieser Konsistenzcheck mit Hilfe eines externen Zusatzprogramms realisiert. Das Zusatzprogramm prüft bei jeder Verknüpfung, ob die gleichen Eigenschaften vorhanden sind. Grundlage für den Konsistenzcheck der Eigenschaften ist eine Excel-Datei mit allen Abhängigkeitsverknüpfungen und Aufzählung der Eigenschaften.

Tab. 5.1: Ausschnitt der Excel-Datei mit Abhängigkeitsverknüpfungen und Aufzählung der Eigenschaften. In Grau wird das Tabellenblatt mit den einwirkenden Eigenschaften dargestellt und in Rot das Tabellenblatt mit den beeinflussten Eigenschaften.

Auf Prozess (Zeile) einwirkende Eigenschaften eines Zustands (Spalte)	Abfallmatrix	Brennelement- Behälter	Sonstige Endlagerbehälter		Von Prozess (Zeile) beeinflusste Eigenschaften des Zustands (Spalte)	Abfallmatrix	Brennelement- Behälter	Sonstige Endlagerbehälter
Korrosion der Brennstoffmatrix	CosTt			↔	Korrosion der Brennstoffmatrix	CorsHop rMdefov		
Alteration von Glas	CorsHop rMdefov				Alteration von Glas	CorsHop rMdefov		
Korrosion von Zementphasen					Korrosion von Zementphasen			
Metallkorrosion	CorsHop rMdefov	CosHop Mfov	CosHop Mfov		Metallkorrosion	CorsHop rMdefov	CosHop Mfov	CosHop Mfov

Die dort aufgeführten Eigenschaften werden in ein Abkürzungssystem überführt, das vom Zusatzprogramm zur Überprüfung der Konsistenz benutzt wird. Findet das Programm eine Inkonsistenz, wird eine Meldung ausgegeben, in dem die fehlenden/überflüssigen

Eigenschaften in eckigen Klammern aufgezählt werden. Im Beispiel oben ist eine Inkonsistenz vorhanden, die eine Reihe von Eigenschaften betrifft:

Einwirkende Eigenschaften von Abfallmatrix (CosTt) <> Beeinflusste Eigenschaften von Korrosion der Brennstoffmatrix (CorsHoprmdefov) [Radioaktivität, Temperatur, Porosität, Permeabilität, Risse, Dichte, Effektive Spannung, Festigkeit, Deformationsvermögen, Volumen]

Mit Hilfe dieser Angaben können die Inkonsistenzen manuell aus den FEP-Einträgen entfernt werden. Die vollständige Excel-Datei befindet sich in Anhang C.

5.9 Offene Fragen

In diesem Textfeld sind die Aspekte erwähnt, die für das aktuelle FEP relevant sind, aber im Detail noch besser untersucht werden müssen. Hier werden auch Fragestellungen genannt, die keinen FuE-Bedarf im eigentlichen Sinne darstellen, aber zu deren Beantwortung noch konkrete Arbeiten durchgeführt werden müssen.

Offene Arbeiten, die in einem Genehmigungsverfahren endlagerspezifisch durchzuführen wären, werden nicht aufgeführt (z. B. Durchführung einer Störfallanalyse).

5.10 Literaturquellen

In diesem Feld sind die in der FEP-Beschreibung angeführten Literaturzitate aufgeführt. Um die Transparenz des FEP-Kataloges zu gewährleisten, wird nur auf veröffentlichte Literatur zurückgegriffen. Zusätzlich zu den Literaturzitaten wird unter „Weiterführende Literatur“ Literatur ergänzt, die für das Verständnis des jeweiligen FEP von Interesse sein kann.

6 Zusammenfassung

Der im Rahmen des ANSICHTT-Projektes erstellte FEP-Katalog SÜD liefert eine Darstellung der Zustände, die den Anfangszustand des Endlagersystems zu Beginn der Nachverschlussphase des Endlagerstandortmodells SÜD charakterisieren sowie der Prozesse, die in einem derartigen Endlagersystem zukünftig ablaufen können.

Der FEP-Katalog zeigt den Zusammenhang zwischen dem geologischen Standortmodell, der geologischen Langzeitprognose, dem Endlagerkonzept und dem Verfüll- und Verschlusskonzept sowie den zukünftigen Entwicklungen und den aus der Einlagerung radioaktiver Abfälle resultierenden Prozesse auf. Er liefert damit eine wichtige Grundlage für die Szenarienentwicklung und Integritätsanalyse.

Der FEP-Katalog liefert Informationen, die es ermöglichen, diejenigen FEP, die für die Systementwicklung nicht von Bedeutung sind, zu identifizieren und somit ein FEP-Screening durchzuführen.

Des Weiteren werden Informationen für die Szenarienentwicklung bereitgestellt. Die Begründungen zur Einteilung der FEP hinsichtlich einer bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit und die direkten Abhängigkeiten zu anderen FEP wurden im FEP-Katalog dokumentiert, damit diese für die Szenarienentwicklung wichtigen Informationen nachvollziehbar bleiben.

Darüber hinaus dient der FEP-Katalog auch als Informationsquelle für den Integritätsnachweis bezüglich der geotechnischen Barrieren. Für den Integritätsnachweis lassen sich aus dem FEP-Katalog Prozesse identifizieren, die auf die geotechnischen Barrieren einwirken. In Müller-Hoeppe (2014) wird, basierend auf dem VSG-Konzept (Steinsalz), geschildert, wie die Einwirkungen auf die Barrieren aus den FEP abgeleitet werden.

Zudem liefert der FEP-Katalog Angaben zur Literatur zu den FEP am generischen Endlagerstandortmodell und stärkt somit die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der in ANSICHT verwendeten Informationen. Die FEP im FEP-Katalog wurden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik beschrieben, mit der Identifizierung offener Fragen liefert der FEP-Katalog einen Beitrag zu Fragestellungen bezüglich der Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Tongestein.

Der FEP-Katalog SÜD wurde für das Projekt ANSICHT entwickelt und bezieht sich auf ein generisches Endlagerstandortmodell, das eine charakteristische Situation im westlichen Molassebecken, nahe dem nordwestlichen Beckenrand, beschreibt. Unterschiede zu vorhergehenden FEP-Katalogen ergeben sich durch wirtsgesteinsspezifische Gründe und aus der Weiterentwicklung der Methodik.

7 Literaturverzeichnis

- BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stand: 30. September 2010, Bonn.
- Jahn, S., Mrugalla, S. & Stark, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis, Projekt ANSICHT: Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht, B3.1/B50112-43/2012-0009, Hannover.
- Jobmann, M., (2016). Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle. Technischer Bericht, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.
- Jobmann, M. & Lommerzheim, A. (2015). Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, Ber.-Nr.: TEC-26-2015-TB, FKZ 02E11061B, Peine.
- Lommerzheim, A., Bebiolka, A., Jahn, S., Jobmann, M., Meleshyn, A., Reinhold, K., Rübel, A. & Stark, L. (2015). Szenarienentwicklung für das Endlagerstandortmodell NORD. FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- Maßmann, J. (2016). Endlagerstandortmodell SÜD – Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. Projekt ANSICHT: Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht, B3/B50112-43/2015-0005/001, Hannover.
- Müller-Hoepe, N. (2014). FEPs and their Designation in the Technical Proof of a Geotechnical Barrier's Safety Function, International Conference on the Performance of Engineered Barriers (PEPS), Feb. 6-7, 2014, pp. 383-389, Hannover, Germany.
- 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.
- Reinhold, K. & Sönke, J. (2012). Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle in Tongestein. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 20 S., Hannover/Berlin.
- Reinhold, K., Stark, L., Kühnlenz, T. & Ptock, L. (2015). Endlagerstandortmodell SÜD – Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. Projekt ANSICHT: Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht: Stand: 06.03.2015, Hannover/Berlin.
- Rübel A. & Meleshyn, A. (2014). Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie (2014): Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Technischer Bericht GRS-338; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- SKB (1989). The joint SKI/SKB scenario development project. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), TR- 89-35: 168 S., App. A-A:5, B-B:4, Stockholm.
- Stark, L. (2014). Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland – ohne Endlagereinfluss, Projekt ANSICHT – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Bundesanstalt für Geowiss. u. Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht, 152 S., Hannover.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Keller, S. & Gerardi, J. (2015). FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Konzept und Aufbau, FuE-Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines

Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Technischer Bericht; DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS; Peine, Hannover, Braunschweig.

Terzaghi, K., & Fröhlich, O. (1936). Theorie der Setzung von Tonschichten. Eine Einführung in die analytische Tonmechanik. Franz Deuticke, Wien.

ANHANG

ANHANG A FEP-Schema SÜD

Zustände	Eigenschaften	Prozesse
Grubengebäude 1. Abfallmatrix 2. Brennelement-Behälter 3. Sonstige Endlagerbehälter 4. Buffer 5. Versatz 6. Migrationssperren 7. Streckenverschlüsse 8. Schachtverschlüsse 9. Technische Einrichtungen 10. Streckenausbau 11. Schachtausbau 12. Auflockerungszone und ungesättigte Zone 13. Korrosionsprodukte im Grubengebäude 14. Lösungen im Grubengebäude 15. Gase im Grubengebäude 16. Übertägige Erkundungsbohrungen 17. Untertägige Erkundungsbohrungen	Thermische Wärmeleitfähigkeit Spezifische Wärmekapazität Temperatur Thermischer Ausdehnungskoeffizient Diffusionskoeffizient Hydraulische Permeabilität Porosität Kompressibilität Fluiddruck Viskosität Mechanische Dichte Volumen Festigkeit Deformationsvermögen Effektive Spannung Topographie Diskontinuitäten Risse Chemische/Mineralogische/Biologische Löslichkeitsprodukt Stoffliche Zusammensetzung Radioaktivität Oberflächenbeschaffenheit Mikrobenpopulation	Geologische Prozesse 25. Vertikale Bewegungen der Erdkruste 26. Orogenese 27. Krustendeformation 28. Grabenbildung 29. Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten 30. Gesteinsmetamorphose 31. Erosion 32. Sedimentation 33. Klimatisch bedingter Wärmestrom 34. Niederschlagseintrag 35. Transgression oder Regression 36. Vorlandvereisung 37. Glaziale Rinnenbildung 38. Meteoriteneinschlag Alterations-Prozesse 39. Korrosion der Brennstoffmatrix 40. Alteration von Glas 41. Korrosion von Zementphasen 42. Metallkorrosion 43. Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme 44. Materialversprödung durch Strahlung 45. Auflösung, Transformation und Neubildung von Tonmineralen 46. Auflösung, Transformation und Neubildung von sonstigen Mineralen 47. Chemische Alteration von Organika 48. Mikrobielle Prozesse THM-Prozesse 49. Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen 50. Quellen und Schrumpfen von Beton 51. Konvergenz 52. Wärmestrom 53. Thermische Expansion oder Kontraktion 54. Phasenübergänge 55. Spannungsfortpflanzung 56. Strömungsvorgänge 57. Dispersion 58. Diffusion 59. Lösen und Ausgasen 60. Migration von Bitumen Chemische und radiologische Prozesse 61. Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung 62. Strahlungsinduzierte Aktivierung 63. Radiolyse 64. Zündung von Gasgemischen 65. Sorption und Desorption 66. Komplexbildung 67. Kolloidbildung und -filtration 68. Thermochemische Sulfatreduktion

Stand: 07.02.2017 09:45

ANHANG B Vergleich zwischen den ANSICHT FEP-Listen NORD und SÜD

ANSICHT NORD		ANSICHTT SÜD		Kommentar
FEP-Nr.	FEP-Titel	FEP-Nr.	FEP-Titel	
1. Externe Einflussfaktoren				
1.1 Endlager-Aspekte				
1.1.12.01	Sicherheitsrelevante, unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase	-	-	Entfällt: Wird im Zuge der Szenarienentwicklung behandelt
1.1.12.02	Kokillensticking	-	-	Entfällt: Wird im Zuge der Szenarienentwicklung behandelt
1.2. Geologische Prozesse und Effekte				
1.2.01 Tektonische Bewegungen und Orogenese				
1.2.01.02	Orogenese	26	Orogenese	
1.2.01.02	Vertikale Bewegungen der Erdkruste	25	Vertikale Bewegungen der Erdkruste	
1.2.02 Plastische, elastische oder Bruchdeformation				
1.2.02.01	Krustendeformation	27	Krustendeformation	
1.2.02.02	Grabenbildung	28	Grabenbildung	
1.2.03 Seismizität				
1.2.03.01	Erdbeben	-	-	Entfällt: Dopplung, Inhalt wird im FEP <i>Spannungsfortpflanzung</i> beschrieben
1.2.04 Vulkanismus und magmatische Aktivitäten				
1.2.04.01	Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten	29	Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten	
1.2.05 Metamorphose				
1.2.05.01	Gesteins-metamorphose	30	Gesteins-metamorphose	
1.2.07 Erosion und Sedimentation				
1.2.07.01	Erosion	31	Erosion	
1.2.07.02	Sedimentation	32	Sedimentation	

1.2.08 Diagenese				
1.2.08.01	Diagenese	-	-	Entfällt: Dopplung, Inhalte in den <i>Alteration</i> , <i>Transformation</i> und <i>Neubildungs</i> -FEP behandelt
1.2.09 Salzdiapirismus und Lösung				
1.2.09.01	Halokinese	-	-	Das Referenzprofil SÜD ist aufgrund der geologischen Bedingungen von keiner Halokinese betroffen
1.3 Klimatische Prozesse und Effekte				
1.3.01 Globale Klimaänderungen				
1.3.01.01	Globale klimatische Veränderungen	33	Klimatisch bedingter Wärmestrom	Aufteilung: Bessere Trennung der mit klimatischen Veränderung verbundenen Teilaspekte
		34	Niederschlagseintrag	
1.3.03 Meeresspiegeländerungen				
1.3.03.01	Transgression oder Regression	35	Transgression oder Regression	
1.3.04 Periglaziale Effekte				
1.3.04.01	Permafrost	-	-	Entfällt: Dopplung, Inhalte in <i>Klimatisch bedingter Wärmestrom</i> behandelt 54 <i>Phasenübergänge?</i>
1.3.05 Glaziale und Vergletscherungseffekte				
1.3.05.02	Vollständige Inlandvereisung	36	Vorlandvereisung	Namensänderung
1.3.05.03	Glaziale Rinnenbildung	37	Glaziale Rinnenbildung	
1.5 Andere externe Faktoren				
1.5.01.01	Meteoriteneinschlag	38	Meteoriteneinschlag	
1.5.03 Sonstige FEP				
1.5.03.01	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	16	Übertägige Erkundungsbohrungen	Aufteilung: aufgeteilt in übertägige und untertägige Erkundungsbohrungen
		17	Untertägige Erkundungsbohrungen	

ANSICHT NORD		ANSICHT SÜD		Kommentar
FEP-Nr.	FEP-Titel	FEP-Nr.	FEP-Titel	
2. Endlagersystem: Umwelteinflüsse				
2.1 Abfälle und technische Merkmale				
2.1.01 Inventar				
2.1.01.01	Inventar: Radionuklide	-	-	Entfällt: Inventar -FEP fallen weg. Inhalte werden in den Zustands-FEP und im Inventarbericht mit beschrieben.
2.1.01.02	Inventar: Metalle	-	-	
2.1.01.03	Inventar: Organika	-	-	
2.1.01.04	Inventar: Sonstige Stoffe	-	-	
2.1.02 Abfallform				
2.1.02.01	Abfallmatrix	1	Abfallmatrix	
2.1.03 Abfallbehälter: Material und Charakteristika				
2.1.03.01	Rückholbare Kokillen	2	Brennelement-Behälter	Aufteilung
		3	Sonstige Endlagerbehälter	
2.1.04 Versatz-/Verfüllmaterial und Charakteristika				
2.1.04.01	Versatz	5	Versatz	
2.1.04.02	Sandverfüllung	-	-	Entfällt: Für das Endlagerkonzept SÜD ist keine Sandverfüllung vorgesehen
2.1.05 Verschlussbauwerke				
2.1.05.01	Verschlussmaterial	-	-	Entfällt: Material-FEP fallen weg. Inhalte werden in den Zustands-FEP mit beschrieben.
2.1.05.02	Untere Schachtverschlüsse	8	Schachtverschlüsse	Zusammenschluss der FEP
2.1.05.03	Obere Schachtverschlüsse			
2.1.05.03	Streckenverschlüsse	7	Streckenverschlüsse	
2.1.05.05	Buffer	4	Buffer	
2.1.05.06	Bohrlochverschlüsse	-	-	Entfällt: Für das Endlagerkonzept SÜD sind keine Bohrlöcher vorgesehen
		6	Migrationssperren	Neu

2.1.05.07	Alteration von Verschlussbauwerken	-	-	Entfällt: wird in <i>Alterations-FEP</i> behandelt
2.1.05.08	Alteration von Versatz	-	-	Entfällt: wird in <i>Alterations-FEP</i> behandelt
2.1.06 Andere, technische Merkmale				
2.1.06.01	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	9	Technische Einrichtungen	
2.1.06.02	Streckenausbau	10	Streckenausbau	
		11	Schachtausbau	Neu
2.1.06.03	Innenliner	-	-	Entfällt: Nicht im Endlagerkonzept SÜD vorgesehen
2.1.07 Mechanisch/hydraulische Prozesse und Auswirkungen auf technische Einrichtungen				
2.1.07.01	Konvergenz	51	Konvergenz	
2.1.07.02	Fluiddruck	-	-	Entfällt: Inhalte werden als Eigenschaft <i>Fluiddruck</i> im jeweiligen Zustands-FEP beschrieben bzw. im Prozess Spannungsfortpflanzung
2.1.07.03	Versatzkompaktion	-	-	Entfällt: Inhalt wird in Prozessen beschrieben
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	-	-	Entfällt: Inhalte werden in dem FEP <i>Quellen und Schrumpfen von Beton</i> beschrieben
2.1.07.07	Lageverschiebung von Schachtverschluss-elementen	-	-	Entfällt: wird im Zuge der Szenarienentwicklung behandelt
2.1.08 Hydraulische/hydrogeologische Prozesse und Verhältnisse im Endlager				
2.1.08.03	Lösungsmengen im Grubenbau	14	Lösungen im Grubengebäude	Umbenennung und andere Definition
2.1.08.04	Kanalisation im Versatz	-	-	Entfällt: Inhalte werden als Eigenschaft <i>Risse</i> im jeweiligen Zustands-FEP beschrieben
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen			Entfällt: Inhalte werden als Eigenschaft <i>Risse</i> im jeweiligen Zustands-FEP beschrieben
2.1.08.07	Strömungsvorgänge im Grubengebäude	56	Strömungsvorgänge	Andere Zuordnung
2.1.08.05	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralien	49	Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen	
		50	Quellen und	Neu

			Schrumpfen von Beton	
2.1.09 Chemische/geochemische Prozesse und Verhältnisse im Endlager				
2.1.09.01	Hydrochemische Verhältnisse im Grubenbau	14	Lösungen im Grubengebäude	Hydrochemie wird im FEP Lösungen im Grubengebäude mit beschrieben
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	-	-	Entfällt: Inhalte werden in den <i>Alteration, Transformation und Neubildungs-FEP</i> beschrieben
		59	Lösen und Ausgasen	Neu
2.1.09.03	Metallkorrosion	42	Metallkorrosion	
2.1.09.04	Korrosion der Brennstoffmatrix	39	Korrosion der Brennstoffmatrix	
2.1.09.05	Korrosion von Glas	40	Alteration von Glas	
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zementphasen	41	Korrosion von Materialien mit Zementphasen	
2.1.09.07	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	43	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	
2.1.09.08	Alteration von Tonmineralen	45	Auflösung, Transformation und Neubildung von Tonmineralen	Andere Definition des FEP
2.1.09.09	Alteration von sonstigen Mineralen	46	Auflösung, Transformation und Neubildung von sonstigen Mineralen	Andere Definition des FEP
		13	Korrosionsprodukte	Neu
2.1.10 Biologische/biochemische Prozesse und Verhältnisse im Endlager				
2.1.10.01	Zersetzung von Organika	47	Chemische Alteration von Organika	
2.1.10.02	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude	48	Mikrobielle Prozesse	Andere Zuordnung
2.1.11 Thermische Prozesse und Verhältnisse im Endlager				
2.1.11.01	Thermische Expansion oder Kontraktion	53	Thermische Expansion oder Kontraktion	
2.1.11.02	Phasenübergänge	54	Phasenübergänge	
2.1.11.03	Wärmebedingte Hebung der Geländeoberfläche	-	-	Entfällt: Die Inhalte werden zum einen über das FEP <i>Spannungsfortpflanzung</i> und <i>Thermische Expansion und Kontraktion</i> abgehandelt
2.1.11.04	Wärmestrom	52	Wärmestrom	

2.1.12 Gasquellen und -effekte im Endlager				
2.1.12.01	Gasbildung	-	-	Entfällt: Die Inhalte werden in den <i>Korrosions</i> -FEP beschrieben
2.1.12.02	Gasmenge im Grubenbau	15	Gase im Grubengebäude	
2.1.12.03	Zündfähige Gasgemische	63	Zündung von Gasgemischen	Änderung in Prozess
2.1.13 Strahlungseffekte				
2.1.13.01	Strahlungsinduzierte Aktivierung	62	Strahlungsinduzierte Aktivierung	
2.1.13.02	Materialversprödung durch Strahlung	44	Metallversprödung durch Strahlung	Präzisierung
2.1.13.03	Radiolyse	61	Radiolyse	
2.1.14 Erreichen einer kritischen Ansammlung (Kritikalität)				
2.1.14.01	Kritikalität	-	-	Entfällt: wird als Eigenschaft der Abfallmatrix behandelt
2.2 Geosphäre				
2.2.01 Auflockerungszone				
2.2.01.01	Auflockerungszone und ungesättigte Zone	12	Auflockerungszone und ungesättigte Zone	
2.2.02 Wirtsgestein				
2.2.02.01	Wirtsgestein	18	Wirtsgestein	
2.2.03 Deck- und Nebengebirge				
2.2.03.01	Nebengebirge	21	Nebengebirge	
2.2.04 Großmaßstäbliche Störungen in der Geosphäre				
2.2.04.01	Störungen und Klüfte in der Geosphäre	-	-	Entfällt: Inhalte werden als Eigenschaft <i>Diskontinuitäten</i> im jeweiligen Zustands-FEP beschrieben
2.2.06 Mechanische Prozesse und Verhältnisse in der Geosphäre (incl. bergbauliche Einflüsse)				
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	55	Spannungsfortpflanzung	
2.2.07 Hydraulische / hydrogeologische Prozesse und Verhältnisse in der Geosphäre				
2.2.07.02	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	-	-	Entfällt: KW werden je nach Zuordnung in flüssig oder gasförmig in den

2.2.07.02	Kohlenwasserstoffvorkommen im Nebengebirge	-	-	jeweiligen Gas-FEP und Lösungs-FEP beschrieben
2.2.07.03	Strömungsvorgänge im Wirtsgestein	56	Strömungsvorgänge	Alle Strömungsvorgänge werden zusammengefasst
2.2.07.04	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge			
2.2.07.05	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge			
		60	Migration von Bitumen	Neu
2.2.08 Chemische/geochemische Prozesse und Verhältnisse in der Geosphäre				
2.2.08.01	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge	22	Lösungen im Nebengebirge	
		23	Gase im Nebengebirge	Neu
2.2.08.02	Hydrochemische Verhältnisse im Wirtsgestein	19	Lösungen im Wirtsgestein	
		20	Gase im Wirtsgestein	Neu
2.2.09 Biologische/biochemische Prozesse in der Geosphäre				
2.2.09.01	Mikrobielle Prozesse im Wirtsgestein	48	Mikrobielle Prozesse	Andere Zuordnung
2.2.09.02	Mikrobielle Prozesse im Nebengebirge			
2.2.10 Thermische Prozesse und Verhältnisse in der Geosphäre				
2.2.10.02	Thermochemische Sulfatreduktion	66	Thermochemische Sulfatreduktion	
2.2.11 Gasquellen und -effekte in der Geosphäre				
2.2.10.01	Gas-Frac im Wirtsgestein	-	-	Entfällt: Inhalt wird im FEP Spannungsfortpflanzung beschrieben
2.3 Oberflächenumgebung				
2.3.01 Topographie und Morphologie				
2.3.01.01	Topographie	-	-	Entfällt: Inhalt wird als Eigenschaft Topographie beschrieben
2.3.04 Aquifere und Gewässer				
2.3.04.01	Oberflächengewässer	24	Oberflächengewässer	

ANSICHT NORD		ANSICHT SÜD		Kommentar
FEP-Nr.	FEP-Titel	FEP-Nr.	FEP-Titel	
3. Endlagersystem: Radionuklide / Schadstoffe				
3.1 Schadstoff-Merkmale				
3.1.01 Radioaktiver Zerfall				
3.1.01.01	Radioaktiver Zerfall	60	Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung	
3.2 Schadstoff-Freisetzung und –migration				
3.2.01 Lösung, Ausfällung und Kristallisation				
3.2.01.01	Radionuklid-Mobilisierung	-	-	Entfällt: Inhalt wird im Transport-FEP beschrieben
3.2.03 Sorption / Desorption				
3.2.03.01	Sorption und Desorption	64	Sorption und Desorption	
3.2.04 Kolloide, Schadstoff-Wechselwirkungen und dadurch ausgelöster Transport				
3.2.04.01	Kolloidbildung, -transport und -filtration	67	Kolloidbildung und – Filtration	Transport wird in anderem FEP beschrieben
3.2.05 Chemische / komplexierende Bestandteile und Effekte auf die Schadstoffe und ihren Transport				
3.2.05.01	Komplexbildung	65	Komplexbildung	
3.2.07 Schadstofftransport im Wasser				
3.2.07.01	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	-	-	Entfällt: Inhalt wird im Transport-FEP Strömungsvorgänge beschrieben
3.2.07.02	Advektion	-	-	Entfällt: Der Transportes durch Advektion wird im FEP Strömungsvorgänge beschrieben
3.2.07.03	Mechanische Dispersion	57	Dispersion	
3.2.07.04	Diffusion	58	Diffusion	
3.2.07.05	Sonstige Transportprozesse	-	-	Entfällt: Inhalt wird im FEP Strömungsvorgänge beschrieben
3.2.09 Schadstofftransport in der Gasphase				
3.2.09.01	Radionuklidtransport in der Gasphase	-	-	Entfällt: Der Transportes der Gasphase wird im FEP Strömungsvorgänge beschrieben

ANHANG C Konsistenzcheck der Eigenschaften

Die Excel-Tabelle (Anlage auf CD) enthält die Grundlage für den Konsistenz-Check der Eigenschaften, der mit Hilfe eines externen Zusatzprogramms realisiert werden kann.

Inhalt:

- Eigenschaften
- P Einwirkende Eigenschaften Ex
- P Beeinflusste Eigenschaften Ex

Und die Legende zu den letzteren beiden.