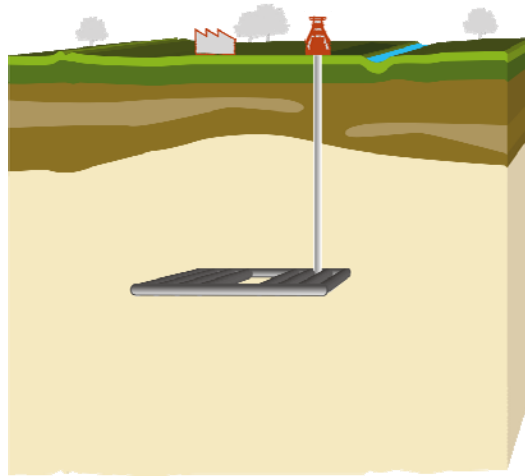


Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

Die Methodik zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen für geologische Endlager



30.09.2008

Bearbeiter:

Fein, E.

Müller-Lyda, I.

Rübel, A.

**Braunschweig / Darmstadt
September 2008**

**Anhang zu GRS-247
ISBN 978-3-939355-22-9**

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter den Kennzeichen 02E9783 und 02E9793 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Die Rolle der Langzeitsicherheitsanalyse im Langzeit- sicherheitsnachweis	5
3	Szenarien mit Einfluss auf die Langzeitsicherheit.....	8
3.1	Typen von Szenarien	9
3.2	Eigenschaften, Ereignisse, Prozesse (FEP) und Szenarien	13
3.2.1	Bedeutung der FEP und der Szenarien für den Langzeitsicherheitsnachweis	14
3.2.2	Kategorisierung der FEP in der NEA Database	21
3.2.3	Entwicklung eines Szenarienkatalogs aus den FEP	25
3.3	Definition der Szenarien der ungestörten Endlager-Entwicklung.....	30
3.4	Zu berücksichtigende alternative Szenarien	34
4	Langzeitsicherheitsanalytische Untersuchungen.....	39
4.1	Quellterm und Mobilisierung	42
4.1.1	Behälterausfall	43
4.1.2	Freisetzung aus der Abfallmatrix.....	44
4.1.3	Auswahl der langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide	45
4.2	Radionuklidtransport im Nahfeld des Endlagers	47
4.2.1	Salzgestein.....	48
4.2.2	Tongestein	53
4.2.3	Granit	54
4.3	Radionuklidtransport im Fernfeld des Endlagers	55
4.3.1	Strömung.....	56
4.3.2	Transport.....	58
4.4	Radiologische Auswirkungen in der Biosphäre	73
4.4.1	Bisheriges Vorgehen in Deutschland	74
4.4.2	Internationale Entwicklung	76
4.5	Anwendung der sicherheitsanalytischen Methoden und Modelle	79
4.5.1	Generische Langzeitsicherheitsanalysen ohne Standortbezug	79
4.5.2	Standortbezogene Langzeitsicherheitsanalysen.....	81
4.6	Schlussbemerkungen.....	87
5	Literatur.....	88
6	Weiterführende Literatur	99

1 Einleitung

Wie in den Kapiteln 4 und 6 des Hauptbands ausgeführt wird, basieren die Sicherheitsaussagen in einem Safety Case, soweit diese die Nachbetriebsphase betreffen, auf dem sogenannten Langzeitsicherheitsnachweis. Im Langzeitsicherheitsnachweis werden die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse dargestellt und damit - in Verbindung mit einer Reihe weiterer unterstützender Argumentationen - belegt, dass das Endlager innerhalb eines geforderten Nachweiszeitraumes oder länger sicher ist. Dabei bedeutet „sicher“, dass die Radionuklide im Endlager so weit isoliert werden, dass von diesen keine unzulässigen Mengen in die Biosphäre gelangen können.

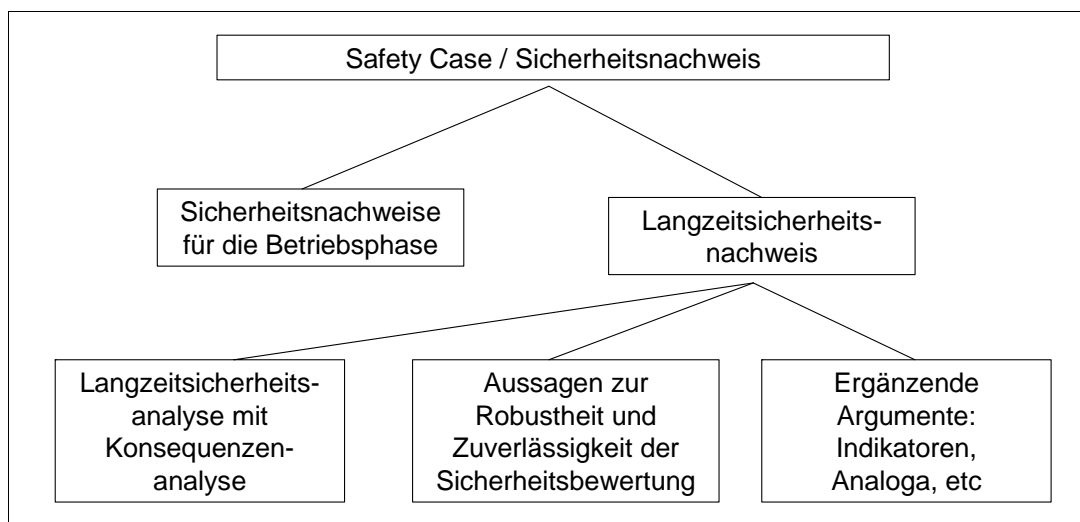


Abb. 1 Zusammenhang von Safety Case, Langzeitsicherheitsnachweis und Langzeitsicherheitsanalyse

Die Beziehung von „Safety Case“ bzw. „Sicherheitsnachweis“, „Langzeitsicherheitsnachweis“ und „Langzeitsicherheitsanalyse“, die im Hauptband in einzelnen Kapiteln ausführlicher dargestellt werden, verdeutlicht Abb. 1: Der umfassende „Safety Case“ / „Sicherheitsnachweis“ enthält alle Argumente zur Begründung der Endlagersicherheit. Die Aspekte der Errichtungs- und Betriebsphase werden in den „Sicherheitsnachweisen für die Betriebsphase“ und die Aspekte der Nachbetriebsphase im „Langzeitsicherheitsnachweis“ behandelt. Im Langzeitsicherheitsnachweis werden alle qualitativen und quantitativen Analysen und Argumente zur Begründung der Sicherheit für die Nachbetriebsphase eines Endlagersystems zusammengeführt.

Der „Langzeitsicherheitsnachweis“ umfasst die „Langzeitsicherheitsanalyse“ und weitere Begründungen zur Sicherheitsaussage und zur Robustheit des Safety Case. Unter

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

„Langzeitsicherheitsanalyse“ wiederum kann die standortspezifische Analyse der Funktion des Endlagersystems im Hinblick auf die radiologischen Konsequenzen verstanden werden.

2 Die Rolle der Langzeitsicherheitsanalyse im Langzeitsicherheitsnachweis

Nach allgemeinem Verständnis ist die Langzeitsicherheitsanalyse die Untersuchung des zukünftigen Verhaltens eines verschlossenen Endlagers mit radioaktiven Abfällen innerhalb eines vorgegebenen Nachweiszeitraums. Dabei werden alle Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und alle dabei stattfindenden Ereignisse und Prozesse betrachtet, sofern diese eine mögliche oder denkbare Radionuklidenausbreitung beeinflussen können. Für alle Entwicklungsmöglichkeiten, die mit einem Entweichen von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich verknüpft sind, werden die potenziellen Strahlenexpositionen ermittelt, die ein in der Zukunft am Endlagerstandort lebender Mensch als Auswirkung des Endlagers empfangen kann.

Die Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager für radioaktive Abfälle befasst sich daher mit den möglichen Ursachen und Abläufen einer Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager sowie deren Auswirkungen auf zukünftige Individuen. Vorrangiger Zweck der Langzeitsicherheitsanalyse ist die quantitative Abschätzung der radiologischen Konsequenzen eines Endlagers in der Nachbetriebsphase, womit demonstriert werden soll, dass die Forderung nach der Einhaltung der radiologischen Schutzziele mit einem hohen Maß an Vertrauenswürdigkeit erfüllt werden kann. Damit stellt die Langzeitsicherheitsanalyse ein notwendiges und unverzichtbares Element jedes Langzeitsicherheitsnachweises und jedes Safety Case dar.

Die Langzeitsicherheitsanalyse muss einerseits darlegen, dass das Endlagersystem die Anforderung nach der Isolation der Radionuklide erfüllt und andererseits auch eine Grundlage für die Bewertung der Robustheit des Endlagerkonzepts liefern. Hierbei wird über eine Szenarienanalyse und eine Konsequenzenanalyse gezeigt, dass das Schutzziel der Endlagerung erreicht wird. Den bestehenden jeweiligen Unsicherheiten bei den Szenarien, Daten und Modellen wird im Langzeitsicherheitsnachweis Rechnung getragen. Nach den aktuellen deutschen Planungen müssen der Langzeitsicherheitsnachweis und damit auch die Langzeitsicherheitsanalyse den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre nach dem Verschließen des Endlagers abdecken /SSK 02/.

Eine Langzeitsicherheitsanalyse umfasst die folgenden Hauptschritte (siehe Abb. 2):

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- Erstellung eines Katalogs der relevanten Szenarien auf Grundlage aller für die zeitliche Entwicklung eines Endlagersystems relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (die so genannten „FEP“ für „Features, Events and Processes“) und der Standorteigenschaften,
- Entwicklung konzeptueller Modelle zur Beschreibung der im Endlagersystem ablaufenden Prozesse,
- Quantitative Beschreibung der Szenarienabläufe mit numerischen Modellen,
- Berechnung der Schadstoffströme und der radiologischen Konsequenzen und Konsequenzenanalyse durch Vergleich der berechneten Konsequenzen mit vorgegebenen Schutzziele,
- Durchführung weiterer Analysen zur Bewertung von Unsicherheiten bei den Daten und Modellen (Unsicherheitsanalyse), zur Bewertung der Robustheit des Endlagersystems (gegenüber Änderungen von Daten oder Randbedingungen) und zur Ermittlung der Sensitivität gegenüber einzelnen Parametern (Sensitivitätsanalyse und probabilistische Analyse).

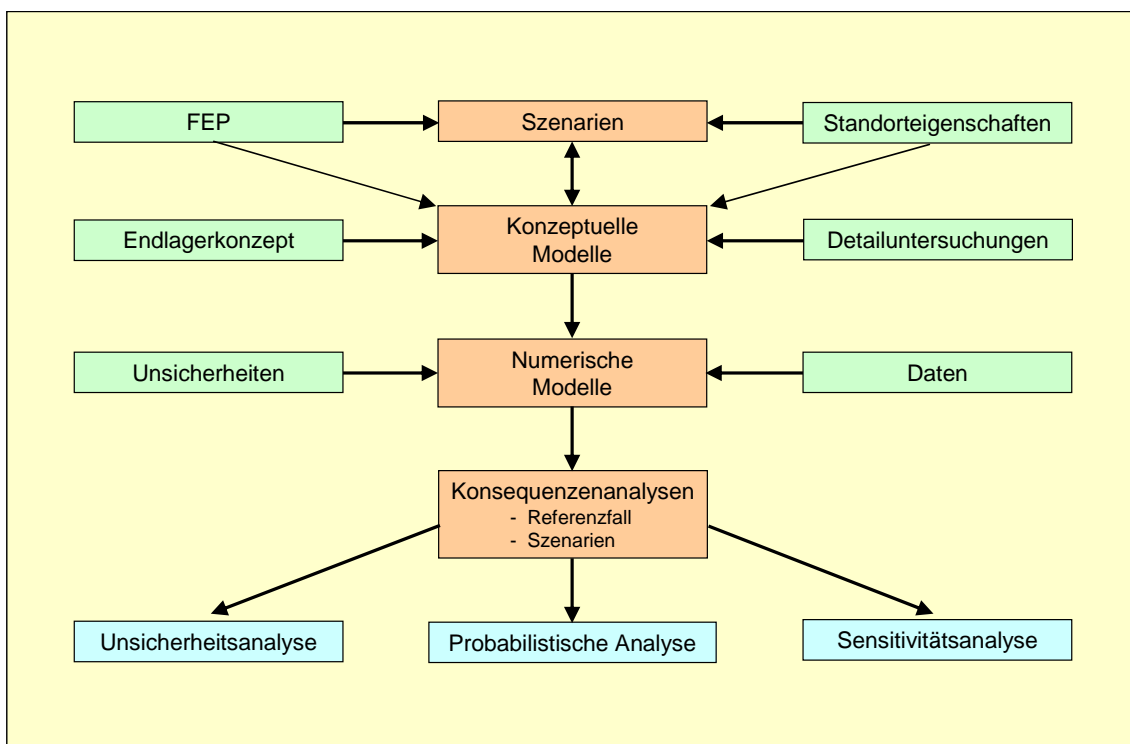


Abb. 2 Hauptschritte einer Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

Die FEP und die Standorteigenschaften beeinflussen die konzeptuellen Modelle entweder direkt oder auch indirekt über die Szenarien.

Die Sicherheitsaussage basiert neben der Langzeitsicherheitsaussage auch auf weitere unterstützenden Argumenten wie die in Abb. 1 aufgeführten Sicherheitsindikatoren. Vorschläge für geeignete Sicherheitsindikatoren wurden auf internationaler Ebene bereits erarbeitet /IAE 94/, /IAE 03b/.

3 Szenarien mit Einfluss auf die Langzeitsicherheit

Die Szenarienanalyse, die im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt wird, ist definiert als „*die qualitative Analyse des Endlagersystems zur Ermittlung aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren Entwicklungen des Systems (Szenarien)*“ /BFS 05/. Szenarienanalysen werden im Rahmen des Realisierungsprozesses von Endlagern als Werkzeug für verschiedene Aufgabenstellungen angewendet. Diese sind u. a.

- Unterstützung im Standortauswahlverfahren,
- Optimierung des Endlagerkonzepts und der Architektur eines Endlagers,
- Bewertung der Robustheit des Endlagersystems,
- Sicherheitsanalysen zum Nachweis der Einhaltung der Schutzziele,
- Vertrauensbildung.

Ein Szenario wird definiert als eine potenzielle, realistische Entwicklungsmöglichkeit eines Endlagersystems, die durch einen oder eine Kombination mehrerer FEP bestimmt ist, welche das System charakterisieren oder beeinflussen. Ein einzelnes Szenario beschreibt somit eine der möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften. Die Entwicklung wird durch den Eintritt von Ereignissen und den Ablauf von Prozessen bestimmt /BFS 04/, /SSK 02/. Insofern stellt ein Szenario gewissermaßen einen „Ablaufplan“ einer der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten eines Endlagersystems dar.

Die den Szenarien zugrunde liegenden FEP können

- Systemeigenschaften oder -merkmale (Features),
- kurzzeitige künftige Ereignisse (Events) oder
- langzeitige physikalische Vorgänge (Processes),

sein, die ein Szenario auslösen oder beeinflussen, das eine Auswirkung auf die Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager haben könnte. Die FEP-Kategorien werden in /BFS 04/ folgendermaßen definiert:

- Ein „Feature“ („Eigenschaft“) ist eine sicherheitsrelevante Eigenschaft, die für die Integrität von Barrieren oder für die Freisetzung bzw. den Transport von Schadstoffen aus dem Endlager von Bedeutung ist (z. B. die Konvergenz von Hohlräumen im Salzgestein oder das Selbstheilungsvermögen von Tonstein).
- Ein „Event“ („Ereignis“) ist ein natürliches oder anthropogenes Phänomen, das über eine kurze Periode des Beurteilungszeitraums auftritt und damit den weiteren Ablauf der Entwicklung des Endlagersystems beeinflusst, also ein Kurzzeitphänomen (z. B. ein Erdbeben in Verbindung mit der Entstehung oder Reaktivierung einer Störung).
- Ein „Process“ („Prozess“) ist ein natürliches oder anthropogenes Phänomen, das über eine signifikante Periode des Beurteilungszeitraums auftritt und damit den Ablauf der Entwicklung mit beschreibt, also ein Lang-Zeit-Phänomen (z. B. Erosion).

International hat sich in Endlagerprojekten bei der Szenarienentwicklung für Sicherheitsanalysen eine gewisse Systematik eingebürgert. Im so genannten „bottom-up-approach“ werden, ausgehend von einer vollständigen FEP-Liste, die FEP ausgewählt, die für das konkrete Endlagerkonzept als potenziell wirksam angesehen werden und diese dann miteinander zu Szenarien gekoppelt.

Alternativ ist auch die als „top-down-approach“ bezeichnete Vorgehensweise zur Ermittlung der relevanten FEP für nicht auszuschließende Freisetzungsszenarien möglich. Dabei werden die Szenarien für ein konkretes Endlagerkonzept nicht systematisch aus einer vollständigen FEP-Liste generiert, sondern durch Experten identifiziert. Die relevanten FEP werden dabei festgelegt, indem untersucht wird, welche Eigenschaften, Prozesse oder Ereignisse zu einem Ausfall oder zu einer Beeinträchtigung einer oder mehrerer Barrieren führen können und welche weiteren Prozesse oder Ereignisse durch einen FEP ausgelöst werden können. Eine derartige Vorgehensweise zur Identifikation von relevanten FEP ist international ebenfalls gebräuchlich, wie beispielsweise beim FEP-Katalog für Endlager in Tonformationen /MAZ 03/.

3.1 Typen von Szenarien

In der Szenarienanalyse werden verschiedene Möglichkeiten der zukünftigen Entwicklung eines verschlossenen Endlagers in Form von Szenarien dargestellt. Ein einzelnes Szenario repräsentiert jeweils eine dieser Entwicklungsmöglichkeiten des End-

lagersystems. Das Szenario, das als die wahrscheinlichste zukünftige Entwicklung angesehen wird, wird als „Szenario der ungestörten Entwicklung“ bezeichnet. Im Fall der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Salzgestein entspricht dieses Szenario beispielsweise dem vollständigen Einschluss der Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich innerhalb der Salzformation. Die Szenarien der ungestörten Entwicklung in den Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Granit werden im Abschnitt 3.3 beschrieben.

Neben den Szenarien, die die Entwicklung des gesamten Endlagersystems einschließen, können aber auch Szenarien entwickelt werden, die nur Subsysteme betreffen, wie z. B. „geotechnische Szenarien“ oder „geochemische Szenarien“.

Jedem Szenario ist eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet, die jedoch in den meisten Fällen nicht exakt bestimmt, sondern allenfalls größenordnungsmäßig abgeschätzt werden kann. Für die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios ist jeweils die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit eines seiner Einzel-FEP maßgeblich. Nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit können Szenarien in folgende drei Kategorien unterteilt werden /BAL98/:

- „Referenzszenarien“, deren Eintreten sicher oder sehr wahrscheinlich ist,
- „Hypothetische Szenarien“, für die entweder niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten oder große Prognoseunsicherheiten bestehen,
- „Praktisch ausgeschlossene Szenarien“ mit sehr niedrigen erwarteten Konsequenzen oder Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Irrelevanz für die konkrete Analyse und
- „Stilisierte Szenarien“, als vorgegebene (z. B. regulatorisch) festgelegte Entwicklung des Endlagersystems oder eines Teilsystems, bei der die Ereignisabläufe am zu betrachtenden Standort nicht detailliert berücksichtigt werden.

Szenarien können auch nach ihrer „Relevanz“, d. h. dem Produkt aus ihrer radiologischen Konsequenz und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit, klassifiziert werden und in der Langzeitsicherheitsanalyse mit entsprechendem Gewicht und Ausführlichkeit behandelt werden (vgl. Abb. 3, darin ist die Relevanz bzw. Irrelevanz durch eine entsprechende Rot- bzw. Grüntönung charakterisiert).

Neben dem Szenario der ungestörten Endlagerentwicklung gibt es weitere Szenarien, die alternative Entwicklungsmöglichkeiten repräsentieren. Diese Szenarien können Prozesse (z. B. Klimaänderungen) oder Ereignisse (z. B. ein unbeabsichtigtes mensch-

liches Eindringen in das Endlager) einschließen. Bei den alternativen Szenarien wird unterstellt, dass eine oder mehrere Eigenschaften oder Prozesse anders ablaufen als im Szenario der ungestörten Entwicklung. Die in einer Langzeitsicherheitsanalyse zu berücksichtigenden alternativen Szenarien werden in Abschnitt 3.4 ausführlicher beschrieben.

		Eintrittswahrscheinlichkeit	
		←← höher	niedriger →→
Radiologische Konsequenzen	→ größer →	<i>a-priori-Ausschluss</i> aufgrund der Standorteigenschaften und die Auslegung des Endlagers	<i>quantitative Abschätzungen</i> Bewertung der Konsequenzen
	←← geringer ←	<i>Langzeit-Sicherheitsanalysen</i> mit Berechnung der Konsequenzen	<i>qualitative Abschätzungen</i> der Konsequenzen

Abb. 3 Grundsätzliche Behandlung der Endlagerrisiken in Langzeitsicherheitsanalysen, in Abhängigkeit von Eintrittswahrscheinlichkeit und radiologischer Konsequenz der unterstellten Szenarien (rot: hohe, grün: niedrige Relevanz)

Für eine systematische Szenarientwicklung ist zunächst eine Abstrahierung der Vorgänge im Endlager notwendig. Die Abb. 4 zeigt als Beispiel schematisch den Ablauf eines Störfallszenarios für ein Endlager im Salzgestein. Dieses Szenario ist durch 4 FEP charakterisiert. Dabei wird angenommen, dass sich Salzlösung aus einem unentdeckten Lösungseinschluss durch aufgelockertes Gebirge bis in die Einlagerungsbereiche ausbreitet, die Abfallbehälter durchkorrodiert und Radionuklide aus der Abfallmatrix herauslöst und schließlich unter dem Einfluss der Gebirgskonvergenz aus dem Endlager in das Deckgebirge ausgepresst wird. Im Kapitel 4 werden die FEP „Radionuklid-Quellterm“ und „Radionuklidtransport“ exemplarisch detaillierter beschrieben.

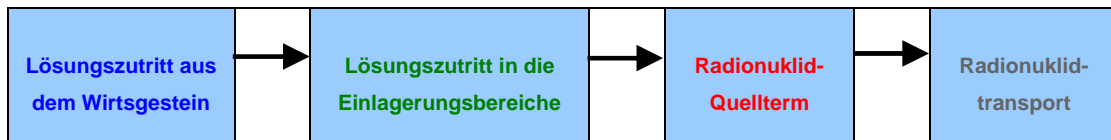


Abb. 4 Szenario „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“:
Ablaufschema der charakteristischen FEP

Die Unsicherheit der Voraussagen zukünftiger Entwicklungen ergibt sich zwangsläufig daraus, dass

- das (Endlager)System außerordentlich komplex ist und sein Anfangszustand nur mit beschränktem Detaillierungsgrad beschrieben werden kann und
- der Nachweiszeitraum generell sehr lang ist, sodass zeitliche Extrapolationen aufgrund der Unsicherheiten bezüglich des Anfangszustands und der Beschreibung der Prozesse mit großen Fehlern behaftet sein können.

In der Szenarienanalyse werden die Szenarien im „bottom-up-approach“ nach einer systematischen Prozedur zusammengestellt, deren Methodik die folgenden fünf Schritte vorsieht /BON 95/:

- Identifikation der für die Langzeitsicherheit relevanten FEP
- Klassifikation der FEP und Überprüfung ihrer Vollständigkeit
- Zusammenfassung der FEP, um ihre Anzahl zu verringern
- Entwicklung von Szenarien, welche die FEP abbilden
- Zusammenfassung mehrerer Szenarien zu repräsentativen Szenarien, um die Anzahl der zu untersuchenden Szenarien zu verringern.

Dabei werden die Schritte nicht notwendigerweise nur einmal in der angegebenen Reihenfolge durchgeführt, sondern können innerhalb eines Endlagerprojekts ggf. auch mehrmals iterativ durchlaufen werden.

Der in der Szenarienanalyse ermittelte Szenarienkatalog ist Ausgangspunkt der Langzeitsicherheitsanalyse, in welcher der Ablauf der Szenarien mit Hilfe von Rechenmodellen simuliert wird. Insbesondere erfolgt auf der Grundlage der Szenarienanalyse der Aufbau der Modelle für die Langzeitsicherheitsanalyse, in denen die im Endlager ablaufenden Prozesse abgebildet werden. Daher ist die umfassende Szenarienanalyse

eine wesentliche Voraussetzung für eine belastbare Langzeitsicherheitsanalyse, d. h. es muss gewährleistet sein, dass alle wesentlichen FEP berücksichtigt werden. Wenn dieses nicht der Fall ist, wäre der Langzeitsicherheitsnachweis lückenhaft. Die Überprüfung der Vollständigkeit des Katalogs der betrachteten Szenarien kann beispielsweise durch Experten, durch einen Vergleich mit anderen internationalen Projekten oder bei den FEP durch einen Abgleich mit Datenbanken vorgenommen werden.

3.2 Eigenschaften, Ereignisse, Prozesse (FEP) und Szenarien

Die FEP bilden die Grundlage zur Erstellung von Szenarien und somit zur Aufstellung des Szenarienkatalogs im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse. Daher wird am Anfang jeder Szenarienanalyse die Liste der FEP zusammengestellt, die so vollständig wie möglich sein und alle denkbaren Einzelaspekte enthalten muss. Eine Kontrolle der Vollständigkeit kann durch den Vergleich mit FEP-Datenbanken, wie z. B. /NEA 99/, /NEA 00/, /MAZ 03/, erfolgen. Neben den eigentlichen FEP müssen auch deren Unsicherheiten berücksichtigt werden. Im Abschnitt 3.2.2 werden wichtige FEP ausführlicher beschrieben.

Die erstellte vollständige FEP-Liste wird anschließend so weit wie möglich gekürzt, indem die FEP mit niedriger Relevanz, d. h. mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und/oder geringer Konsequenz (vgl. Abb. 3) ausgeschlossen werden. Alle FEP, deren Relevanz nicht abgeschätzt werden kann, müssen weiter berücksichtigt werden. Der Ablauf der in der FEP-Liste enthaltenen Ereignisse wird dann in Szenarien dargestellt, die die Entwicklung des Gesamtsystems Endlager - Geosphäre -Biosphäre beschreiben. Ähnliche Szenarien werden dabei nach Möglichkeit zu Gruppen zusammengefasst und für diese Gruppen jeweils nur ein repräsentatives, abdeckendes Szenario betrachtet. Auf diese Art kann der Aufwand bei der Langzeitsicherheitsanalyse reduziert werden, weil langzeitsicherheitsanalytische Rechnungen nur noch für die abdeckenden Szenarien notwendig sind.

Ereignisse (Events) und Prozesse (Processes), welche die Entwicklung des Endlagersystems bestimmen, können entweder durch äußere Einwirkungen, z. B. Klimaänderungen oder Bewegungen in der Erdkruste, verursacht werden und durch interne Einwirkungen, wie z. B. bergbauliche Auswirkungen oder die Wärme- und Gasentwicklung der Abfälle. Eigenschaften (Features) sind alle Mechanismen, die zur Isolation der Schadstoffe beitragen, wie die Sorption oder die Durchlässigkeit des Wirts-

gesteins. Die FEP können unterschieden werden nach FEP, die von natürlichen Ursachen, FEP, die durch das Endlager und FEP, die durch menschliches Handeln verursacht werden.

International wird eine Vielzahl an FEP diskutiert, die z. B. je nach Wirtsgestein, Standort und Auslegung eines Endlagers von unterschiedlicher Bedeutung sind. Diese international diskutierten und für alle Endlagervarianten anwendbaren generischen FEP wurden in einer Datenbank zusammengetragen und von der OECD/NEA veröffentlicht /OEC 00/. Diese Datenbank erfährt durch fortlaufende Diskussion und den stetigen Kenntniskern durch laufende Endlagerprojekte eine kontinuierliche Aktualisierung (z. B. /OEC 05/) und Ergänzung/Spezifizierung für bestimmte Wirtsgesteine (z. B. für Ton /OEC 03/, eine Version für Salz ist in Vorbereitung).

3.2.1 Bedeutung der FEP und der Szenarien für den Langzeitsicherheitsnachweis

In der Szenarienanalyse werden repräsentative Szenarien ermittelt, deren Konsequenzen die Konsequenzen aller denkbaren Szenarien des vollständigen Szenarienkatalogs abdecken. Bei den repräsentativen Szenarien kann differenziert werden nach „natürlichen Entwicklungen“ und solchen Entwicklungen, die ein menschliches Eindringen in das Endlager einschließen /SSK 02/.

Nach einem Vorschlag des BfS /BFS 04/ können die Szenarien für das verschlossene Endlager in die drei sogenannten Entwicklungskategorien

1. zu erwartende Entwicklungen,
2. außergewöhnliche Entwicklungen und
3. weitere spezielle Entwicklungen

unterteilt werden, vgl. Abb. 5.

Für die Zuordnung der Szenarien zu den drei oben genannten Entwicklungskategorien werden die FEP jedes repräsentativen Szenarios herangezogen. Maßgeblich für die Zuordnung eines Szenarios zu den Entwicklungskategorien ist die Einschätzung, wie wahrscheinlich seine einzelnen FEP ein- bzw. auftreten. Dabei wird die Wahrschein-

lichkeit des gesamten Szenarios in erster Linie durch die Eintrittswahrscheinlichkeit des unwahrscheinlichsten seiner FEP bestimmt /BFS 04/, /SSK 02/.

Entwicklungs-kategorie	Ereignisse und Vorgänge	Maßnahmen
1	Zu erwartende Entwicklungen	Sorgfältige Auswahl des Standortes Sicherheitsabstand zu den Belastungsgrenzen der geologischen Barrieren Verschluss des Endlagers gemäß Stand von Wissenschaft und Technik
2	Außergewöhnliche Entwicklungen	Bewertung der Sicherheitsreserven des Standortes Anordnung zusätzlicher Barrieren
3	Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen	Übermittlung der Information Standortauswahl Anlagenauslegung
	SPEZIALFÄLLE Meteoriteneinschlag	Standortauswahl

Abb. 5 Entwicklungskategorien für ein verschlossenes Endlager /BFS 04/

Zur Einordnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der FEP müssen diese so formuliert sein, dass die Frage nach der Möglichkeit ihres Ein- bzw. Auftretens beantwortet werden kann. Hierbei ist Folgendes zu beachten:

- **Eigenschaft:** Eine Eigenschaft ist dann relevant, wenn sie in einer für das Eintreten des jeweiligen Szenarios hinreichend ausgeprägten Form vorliegt. Das Vorliegen der Eigenschaft "Kluft im einschlusswirksamen Gebirgsbereich" ist beispielsweise allein noch nicht hinreichend. Eine Kluft wird erst dann relevant, wenn sie durchlässig, nicht isoliert ist und außerdem nahe genug an einem Einlagerungsbereich liegt. Damit entscheiden weitere Eigenschaften darüber, welcher Entwicklungskategorie ein darauf aufbauendes Szenario zuzuordnen ist.
- **Ereignisse und Prozesse:** Das Ereignis bzw. der Prozess muss in einem für den Eintritt des Szenarios ausreichenden Ausmaß und zu einer Zeit auftreten, die für die Konsequenzenanalyse relevant ist. Das Ereignis "Erdbeben" ist z. B. nur relevant, wenn es innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren in einer für die Bildung von Wegsamkeiten ausreichenden Stärke auftreten kann.

Hinsichtlich der Eigenschaften wird folgende Einordnung vorgeschlagen /BFS 04/, /SSK 02/:

- Eigenschaften, die entweder bei der Standorterkundung ermittelt wurden oder deren Vorhandensein an vergleichbaren Standorten bekannt ist, werden in die Klasse der zu erwartenden FEP eingeordnet (Beispiel: eine bei der Standorterkundung angetroffene wasserführende Kluft).
- Kann einer Eigenschaft, - etwa aufgrund der Genauigkeit der Standorterkundung bzw. der Qualitätsmerkmale der technischen und geotechnischen Anlagen des Endlagers - eine deutlich geringere Eintrittswahrscheinlichkeit als 1 zugeordnet werden (z. B. mit Hilfe von Statistiken über Produktionsfehler von Abfallbehältern oder anderen technischen Komponenten oder wegen des Auflösungsvermögens der angewendeten geophysikalischen Erkundungstechniken) wird es in die Klasse der außergewöhnlichen FEP eingeordnet. Obgleich den geologischen Eigenschaften in der Regel keine exakten Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können, sollen sich zu erwartende und außergewöhnliche Eigenschaften größenordnungsmäßig deutlich unterscheiden. Dies muss, wenn keine genauen Zahlenwerte ermittelt werden können, durch eine qualitative Begründung und fundierte Expertenschätzungen abgesichert werden.
- Eine Eigenschaft kann ausgeschlossen werden, wenn es weder Gründe für ihr Auftreten gibt noch die Erkundungsergebnisse belegen, dass sie vorhanden ist, oder die zu treffenden Annahmen weit außerhalb jeglicher Erfahrung liegen.

Die Szenarien der ersten Kategorie (erwartete Entwicklungen) sind ausschlaggebend bei der Prüfung alternativer Endlagerstandorte, der jeweiligen Anlagenplanungen und den daraus resultierenden Entscheidungen. Erreicht werden muss, dass

- durch eine sorgfältige und qualifizierte Standortauswahl,
- mit der gewählten Anlagenauslegung und
- dem Konzept für den Verschluss des Endlagers nach Stand von Wissenschaft und Technik

die zuverlässige, gut beschreibbare und wartungsfreie Isolation der radioaktiven Abfälle sicher erwartet werden kann. Die zuverlässige Funktion des Endlagers in der Nachbetriebsphase muss dabei im Vordergrund der Beurteilung stehen. Dies beinhaltet auch, dass Sicherheitsabstände zu den Grenzen der zulässigen Belastung der

geologischen Barrieren durch Einwirkungen des Endlagers berücksichtigt werden. Solche Einwirkungen können z. B. aus den erforderlichen Hohlraumauffahrungen oder dem Wärmeeintrag und der Gasbildung aus den radioaktiven Abfällen resultieren.

Bei den Szenarien der zweiten Entwicklungskategorie (außergewöhnliche Entwicklungen) werden die Sicherheitsreserven der geologischen Barrieren und die der möglicherweise ergänzenden geotechnischen und technischen Barrieren herangezogen. Es muss gezeigt werden, dass bei den außergewöhnlichen Entwicklungen nur eine begrenzte Freisetzung von Schadstoffen aus dem Endlager stattfindet und dass auch hierbei die Schutzziele der Endlagerung eingehalten werden. Wegen des hohen Gefahrenpotenzials der hochradioaktiven Abfälle in den ersten 10.000 Jahren des Nachweiszeitraums muss die Auslegung des Endlagers gewährleisten, dass in diesem Zeitraum auch bei außergewöhnlichen Entwicklungen die Ausbreitung radioaktiver Stoffe in die Biosphäre zuverlässig verhindert wird. Zusätzlich muss die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten aller voneinander unabhängigen außergewöhnlichen Entwicklungen bekannt sein. Einzelfallbetrachtungen müssen durchgeführt werden, wenn die Konsequenzen einer einzelnen außergewöhnlichen Entwicklung einen großen Teil des vom Endlager ausgehenden radiologischen Gesamtrisikos ausmachen. Die Bewertung des Risikos der Szenarien der zweiten Kategorie soll die für die der ersten Kategorie getroffenen Entscheidungen stützen. Zur Verringerung der Risiken besteht die Möglichkeit, zusätzliche geotechnische und technische Barrieren in das Endlagerkonzept aufzunehmen.

Die dritte Entwicklungskategorie (spezielle Entwicklungen) umfasst die Szenarien, die unvermeidbar sind und deren Risiko für Mensch und Umwelt nicht bewertet werden kann. Dennoch soll hierbei geprüft werden, ob die Standortauswahl und Endlagerauslegung im Hinblick auf die Auswirkungen der speziellen Entwicklungen optimiert werden können.

Die FEP können wiederum wie in Abb. 6 dargestellt weiter klassifiziert werden, wobei diese danach unterschieden werden, ob sie natürlichen Ursprungs sind, durch das Endlager bedingt sind oder durch anthropogene Ereignisse hervorgerufen werden.

	Natürliche Ereignisse und Prozesse ... am Standort oder an vergleichbaren Standorten in den letzten 10 Mio. Jahren eingetreten		Durch das Endlager bedingte Ereignisse und Prozesse ... theoretisch ableitbar oder Hypothesen	Sonstige von Menschen hervorgerufene Ereignisse und Prozesse ... übliche Aktivitäten des Menschen
1. Entwicklungs-Kategorie	Auslöser immer noch da	am Standort oder an vergleichbaren Standorten aufgetreten	Beanspruchung durch Wärme, Gas etc. innerhalb der Erwartungswerte	an oder nahe der Erdoberfläche
	nein	ja	nein	nein
2. Entwicklungs-Kategorie	Reaktivierung an vergleichbaren Standorten beobachtet	Wiederholungszyklus länger oder Effekte stärker als erwartet	Beanspruchung größer, Belastungsgrenze niedriger als erwartet	im tiefen Untergrund in der Nähe des Endlagers
	nein		nein	nein
3. Entwicklungs-Kategorie	Reaktivierung theoretisch möglich aber nicht beobachtet		Hypothesen	Eindringen in die Barrieren des Endlagers

Abb. 6 Zuordnung von Ereignissen und Prozessen zu den Entwicklungskategorien /BFS 04/

Die FEP zur Beschreibung natürlicher Vorgänge erfassen geologische, klimatologische und astronomische Ereignisse und Prozesse. Diese FEP können anhand der folgenden Kriterien klassifiziert werden (siehe Abb. 6, 2. Spalte):

- Ist ein FEP in den letzten 10 Millionen Jahren am betrachteten oder an vergleichbaren Standorten nicht aufgetreten, kann dieser unberücksichtigt bleiben (wenn z. B. die Hauptphase einer Gebirgsbildung über 10 Millionen Jahre zurückliegt).
- FEP, die innerhalb der letzten Million Jahren aufgetreten sind, rezent andauern und/ oder über ein großes Wiederholungspotenzial für die kommende eine Million Jahre verfügen, werden in die Klasse der zu erwartenden FEP eingeordnet (z. B. Inlandsvereisung, zyklisches Auftreten von Dauerfrost, Hebung, rezent andauernde Erosion).
- Handelt es sich um Ereignisse und Prozesse, die in den letzten 10 Millionen Jahren zwar aufgetreten sind, für die aber der Nachweis geführt werden kann, dass sie weder rezent andauern noch in kürzeren Zyklen als einer Million Jahren auftreten, werden sie der Klasse der außergewöhnlichen FEP zugeordnet. Dies gilt auch für Ereignisse und Prozesse, die zu Effekten führen, die in ihrer Stärke außerhalb der beobachteten Schwankungsbreite liegen.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- Wenn das Ereignis oder der Prozess in den letzten 10 Millionen Jahren am Standort oder an vergleichbaren Standorten ein- bzw. aufgetreten ist, der Antriebs- oder Auslösemechanismus am Standort zwar nicht mehr existiert, aber eine Reaktivierung an vergleichbaren Standorten beobachtet wurde, ist das FEP ebenfalls ein außergewöhnliches FEP (z. B. Reaktivierung von Klüftzonen).
- Wenn das Ereignis oder der Prozess in den letzten 10 Millionen Jahren am Standort oder an vergleichbaren Standorten ein- oder aufgetreten ist, der Antriebs- oder Auslösemechanismus am Standort jedoch nicht mehr existiert und eine Reaktivierung an vergleichbaren Standorten nicht beobachtet wurde, diese aber gleichwohl theoretisch möglich ist, ist das FEP ein Spezialfall (z. B. die Entstehung neuer Klüftzonen).

Da Erfahrungen über die langzeitigen Auswirkungen eines Endlagers nicht vorliegen, müssen sich die Vorstellungen über Ereignisse und Prozesse, die durch das Endlager verursacht werden (Wärmeentwicklung, Gasbildung, Konvergenz der Hohlräume sowie chemische Wechselwirkungen) im Wesentlichen auf Modellvorstellungen und Modellrechnungen und eventuell auf Analoga abstützen. Es wird folgende Einordnung vorgeschlagen /BFS 04/, /SSK 02/ (siehe Abb. 6, 3. Spalte):

- Liegen den Modellvorstellungen und Berechnungen Daten und Berechnungsansätze zugrunde, die innerhalb einer durch Erfahrungswerte (auf die Standortverhältnisse übertragbare Messwerte) abgestützten Schwankungsbreite liegen, werden die daraus abgeleiteten Ereignisse und Prozesse in die Klasse der zu erwartenden FEP eingeordnet.
- Liegen den Modellvorstellungen und Berechnungen Daten zugrunde, die außerhalb der durch Erfahrungswerte abgestützten Schwankungsbreite liegen, sind die daraus abgeleiteten Ereignisse und Prozesse in die Kategorie der außergewöhnlichen FEP einzustufen. Hierunter fallen z. B. Ereignisse und Prozesse, die nur zustande kommen können, wenn beispielsweise ungewöhnlich hohe Raten der Gasbildung aus den Abfällen oder eine extrem geringe thermomechanische Belastbarkeit von geologischen Barrieren angenommen wird.
- Ereignisse und Prozesse, die nur aufgrund hypothetischer Modellvorstellungen und Berechnungen abgeleitet werden können und durch keine Erfahrungen oder plausible Annahmen gestützt sind, können zur Bewertung von Sicherheitsreserven he-

rangezogen werden. Sie werden in die Klasse der Spezialfälle eingeordnet und in Sicherheitsanalysen üblicherweise als "What-If"-Fälle bezeichnet¹.

Ereignisse und Prozesse, die durch menschliches Handeln ausgelöst werden, werden gemäß siehe Abb. 6, 3. Spalte 4): kategorisiert: Danach können solche Ereignisse oder Prozesse,

- die durch heute technisch und gesellschaftlich plausible Aktivitäten auf oder nahe der Erdoberfläche verursacht werden (z. B. der Bau eines Brunnens) in die Klasse der zu erwartenden FEP,
- die durch heute technisch und gesellschaftlich plausible Aktivitäten im tieferen Untergrund in der Nähe des Endlagers verursacht werden, in die Klasse der außergewöhnlichen FEP und
- die durch ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager verursacht werden, in die Klasse der Spezialfälle

eingeordnet werden. Ferner werden bei der Szenarienauswahl folgende Regeln angewendet:

- Wenn mindestens ein das Szenario definierender FEP ausgeschlossen werden kann, muss das Szenario nicht weiter betrachtet werden.
- Ein Szenario wird der ersten Entwicklungskategorie (zu erwartende Entwicklungen) zugeordnet, wenn alle definierenden FEP erwartet werden müssen.
- Ein Szenario wird der zweiten Entwicklungskategorie (außergewöhnliche Entwicklungen) zugeordnet, wenn mindestens ein definierendes FEP zu erwarten ist und die übrigen FEP nicht auszuschließen und keine Spezialfälle sind.
- Das Szenario wird der dritten Entwicklungskategorie (spezielle Entwicklungen) zugeordnet, wenn mindestens ein definierendes FEP als Spezialfall eingeordnet wurde.

Einen besonderen Szenariotyp bilden solche Szenarien, die ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlagersystem einschließen. Solche Szenarien kön-

¹ In einem „What-if-Szenario“ wird beispielweise die unrealistische Annahme zugrunde gelegt, dass kein Deckgebirge vorhanden ist.

nen sowohl ein direktes Eindringen in das Endlager mit einer damit verbundenen Beschädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und/oder der eingelagerten Abfälle als auch nur Störungen des lokalen Grundwasser-Fließsystems beinhalten. Diese Möglichkeiten sind unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse zu analysieren und zu bewerten. Die ermittelten potenziellen radiologischen Auswirkungen sollen nach /SSK 02/ im Sinne der ICRP-Empfehlung Nr. 81 zum Strahlenschutz bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle /ICR 00/ bewertet werden. Danach sind angemessene Maßnahmen vorzusehen, die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Eindringens oder seine potenziellen radiologischen Auswirkungen zu begrenzen. Hierbei sind auch die Anzahl der betroffenen Personen, das räumliche Ausmaß einer möglichen Kontamination und die Möglichkeiten der Begrenzung von Auswirkungen sowie von Gegenmaßnahmen zu betrachten. Bei der Behandlung der Szenarien, die das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in ein Endlager beschreiben, ist davon auszugehen, dass das Wissen über das Endlager für mindestens 500 Jahre nach dessen Verschluss erhalten bleibt, was somit als frühester Zeitpunkt für deren Eintreten anzunehmen ist /SSK 02/.

3.2.2 Kategorisierung der FEP in der NEA Database

Auf Initiative der OECD/NEA wurde ein generischer FEP-Katalog - die so genannte „NEA-FEP-Database“ - erarbeitet, in dem FEP für alle infrage kommenden Endlagervarianten und geologischen Formationen zusammengestellt sind /OEC 00/. Diese Datenbasis umfasst auch FEP, die für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen in Deutschland von vornherein irrelevant sind. Die FEP werden in die vier Hauptkategorien: Untersuchungsbasis, externe Faktoren, Umweltfaktoren im Bereich des Endlagers sowie den Einfluss der Radionuklide und Kontaminanten unterteilt. Diese sind in Tab. 1 aufgeführt.

Die FEP in der Datenbank werden durch drei Zahlen, die durch Punkte getrennt sind, eindeutig charakterisiert. Einige ausgewählte FEP aus der Tab. 1 werden nachfolgend kurz erläutert, detailliertere Erläuterungen sind in /OEC 00/ enthalten.

FEP 1.1.7 Annahmen zur Dosiswirkung

Die Darstellung der Dosis-Wirkungs-Beziehung gibt Auskunft über die Gefährdung des Menschen durch eine Strahlenexposition. Die Wirkung niedriger Strahlendosen wird

durch Extrapolation der beobachteten Wirkungen bei höheren Dosen unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs ohne Schwellenwert beschrieben.

FEP 2.1.4 Verschluss und Abdichtung eines Endlagers

Die Intention zum Verschluss und zur Abdichtung eines Endlagers ist der Schutz des Menschen vor den Gefährdungen durch Abfälle. Einzelne Abschnitte des Endlagers können sequenziell abgeschlossen werden, wobei diese Maßnahmen auf das Gesamtkonzept des Endlagerverschlusses abgestimmt sein müssen.

FEP 2.3.5 Lokale Auswirkungen der Eisbedeckung bei Eiszeiten

Auswirkungen durch die Eisüberdeckung (bei Eiszeiten) eines Endlagers führen z. B. zu einem Wechsel der Geomorphologie, zu Erosion, zu Schmelzwasser oder zu hydraulischen Effekten. Erosionsprozesse aufgrund eiszeitlicher Vorgänge bringen morphologische Veränderungen der Erdoberfläche mit sich (z. B. Bildung von Moränen, subglazialer Sande und Talbildungen).

FEP 2.4.2 Versehentliche / absichtliche menschliche Eingriffe in ein Endlager

Hierbei muss zwischen unbeabsichtigten Handlungen - ohne Kenntnis eines Endlagers - und absichtlichen Handlungen - z. B. bewusste Rückholung der Abfälle - unterschieden werden. Diese beiden Fälle stellen Grenzfälle dar, da auch menschliche Eingriffe bei nur teilweiser Kenntnis über das Endlager möglich sind.

FEP 3.1.8 Hydrologische bzw. hydrogeologische Prozesse und Bedingungen (Abfall und künstliche Barrieren)

Dieses FEP beschreibt hydrologische / hydrogeologische Prozesse, die einen Einfluss auf die Abfälle, die Behälter oder andere technische Funktionen im Nahfeld haben. Beispiele für diese Prozesse sind die Infiltration und Bewegung von Flüssigkeiten im Endlagerbereich sowie die Sättigung und Entsättigung im Endlager und seinen Komponenten.

FEP 3.2.5 Charakteristika der Transportpfade der Kontaminanten (Geosphäre)

Der Transport von Schadstoffen durch das Gestein der Geosphäre (einschließlich des Wirtsgesteins) erfolgt überwiegend advektiv durch Wasserströmungen. Diese sind ab-

hängig von den Gesteinseigenschaften. So können durch Stoffe die Poren oder Klüfte im Gestein transportiert werden. Die Konvergenz der Hohlräume kann dabei die Antriebskraft für diese Lösungsströme und den damit einhergehenden Schadstofftransport sein.

FEP 3.3.11 Hydrologischer Haushalt und Wasserbilanz

Das hydrologische System beschreibt die Wasserbewegungen nahe der Oberfläche. Diese schließen die Bewegung von Stoffen ein, die an das Wasser gebunden sind (z. B. Lösungen, Sedimente und Partikel). Extreme Randbedingungen wie Dürre, Überschwemmungen, Stürme und Schneeschmelzen können hierfür relevant sein.

FEP 3.4.3 Ernährungs- und Trinkgewohnheiten

In diesem FEP werden die Verzehrsgewohnheiten betrachtet, welche die Strahlenexpositionen bestimmen, wenn Nahrungsmittel und Trinkwasser (Grundwasser, Boden) kontaminiert werden.

FEP 4.2.5 Chemische Komplexbildung als Transportfaktor für Kontaminanten

Durch dieses FEP wird der Transport von radiotoxischen und chemotoxischen Spezies beschrieben, die an Komplexierungsmittel gebunden sind. Dabei werden alle chemischen Stoffe berücksichtigt, die im Endlagersystem vorhanden sind und Einfluss auf die Freisetzung und Migration von Radionukliden aus dem Endlager in die Umwelt haben können. Solche Stoffe können mit den Abfällen, den Baustoffen oder als Betriebsstoffe (z. B. Öle oder hydraulische Flüssigkeiten) eingebracht werden.

FEP 4.3.1 Konzentration in Trinkwasser, Lebensmitteln und Arzneimitteln

Die Anwesenheit von radiotoxischen bzw. chemotoxischen Stoffen in Trinkwasser, Nahrungsmitteln etc., die vom Menschen verzehrt werden können, wird durch diesen FEP abgebildet.

Die FEP in Tab. 1 und die vorstehend beschriebenen exemplarischen FEP verdeutlichen, wie vielfältig sich die Einflüsse auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers gestalten und dass neben den üblicherweise betrachteten geologischen Einflussfaktoren noch weitere Faktoren zu berücksichtigen sind.

Der FEP-Katalog der OECD/NEA /OEC 00/ ist generisch, d. h. die darin enthaltenen FEP sind unabhängig von bestimmten Standorten oder Wirtsgesteinen, sodass dieser Katalog als Grundlage für alle Langzeitsicherheitsanalysen geeignet ist. In einem konkreten Endlagerprojekt sind nicht notwendigerweise sämtliche der in diesem Katalog enthaltenen FEP relevant. Ihre Relevanz muss daher fallweise konservativ im Hinblick auf einen festgelegten Endlagerstandort bewertet werden. Dabei muss auch berücksichtigt werden, welche Abfälle in das Endlager eingebracht werden sollen.

Nach dem aktuellen deutschen Konzept erfolgt die Endlagerung aller radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen ohne die Option einer Rückholbarkeit der Abfälle. Deswegen kann z. B. der FEP 2.1.13 zur Rückholbarkeit unberücksichtigt bleiben. Dieser FEP betrifft die Vorbereitung und die Maßnahmen, um eine Rückholbarkeit zu realisieren. Da die Abfälle in den tiefen geologischen Untergrund eingebracht werden, bedürfen sie nach dem Verschluss des Endlagers keiner dauerhaften Überwachung mehr. Wartungs- und ggf. Sanierungsmaßnahmen im Endlager sind nach dessen Verschluss auch weder möglich noch nötig. Damit kann auch der FEP 2.4.10 („Wartung des Endlagers“) - von vornherein unberücksichtigt bleiben. Werden die Randbedingungen durch Vorab-Festlegungen weiter eingegrenzt, können sich weitere FEP als irrelevant erweisen.

FEP dürfen bei einer systematischen Untersuchung nicht deswegen unberücksichtigt bleiben, weil ihre Umsetzung in mathematische Gleichungen schwierig ist oder nicht abgeschätzt werden kann, wann und in welcher Weise sie eintreten könnten (z. B. die FEP zu den Szenarien zum menschlichen Eindringen in ein Endlager).

Da es sehr wichtig ist, dass bei diesem Auswahlprozess alle FEP berücksichtigt werden, die aufgrund der Wirtsgestein- und Standortgegebenheiten relevant sind, ist dieser konservativ und mit größter Sorgfalt durchzuführen.

Eine umfangreiche, aktuelle Zusammenstellung aller FEP, die für eine Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einem Salzstock in der norddeutschen Tiefebene als relevant angesehen werden und eine Darstellung der wesentlichen Aspekte zu den Ereignissen und Prozessen, die in einem derartigen Endlagersystem ablaufen können, wird in /DBE 08/, /BGR 08/ gegeben. Dieser FEP-Katalog ist für den Referenzstandort entwickelt worden, dessen standortspezifische, geowissenschaftliche Merkmale entsprechend den vorhandenen Daten zum Standort Gorleben festgelegt wurden. Der FEP-Katalog kann mit einer entsprechenden Überarbeitung an andere Standorte an-

gepasst werden, wenn deren geologische Situation und das vorgesehene Endlagerkonzept mit denen des Referenzstandorts vergleichbar sind.

3.2.3 Entwicklung eines Szenarienkatalogs aus den FEP

Das Prozedere der Szenarienauswahl liefert einen Satz an formations-, standort- oder konzeptspezifischen FEP, welche, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, anschließend die Grundlage für die Bewertung der Langzeitsicherheit bilden. Aus diesem FEP-Satz werden die Szenarien gebildet und diese zu einem Szenarienkatalog zusammengefasst. Dabei kann ein Szenario aus einem einzelnen FEP oder, wie das Lösungszutrittsszenario in Abb. 4, aus einer Kombination mehrerer FEP gebildet werden. Die so gebildeten Szenarien sind entsprechend den Randbedingungen am Standort in die Langzeitsicherheitsanalyse einzubeziehen, wobei berücksichtigt werden muss, welchen der in Abschnitt 3.2.1 in der Abb. 5 beschriebenen Entwicklungskategorien die Szenarien zugeordnet sind. Mit dieser Vorgehensweise kann das Gefährdungspotenzial eines Szenarios quantifiziert werden. Für einige Szenarien ist das radiologische Gefährdungspotenzial nicht einfach zu quantifizieren (z. B. FEP 2.5.1 Meteoriteneinschlag). Für diese Szenarien müssen innerhalb einer Langzeitsicherheitsanalyse geeignete Vorgehensweisen festgelegt werden, um sie angemessen berücksichtigen zu können.

Tab. 1 Katalog generischer FEP für Endlager-Sicherheitsanalysen (nach /OEC 00/)

Untersuchungsbasis	Externe Faktoren	Umweltfaktoren	Einfluss der Kontaminanten
1.1.1 Auswirkungen des Betriebes	2.1 Endlagerbedingungen	3.1 Eigenschaften des Abfalls und technische Ereignisse	4.1 Charakteristika der Kontaminanten
1.1.2 Zeitskala des Betriebes	2.1.1 Erkundung / Untersuchung des Standortes	3.1.1 Inventar an Radionukliden und anderen Stoffen	4.1.1 Radioaktiver Zerfall und Zerfallsketten
1.1.3 Flächennutzung des Betriebes	2.1.2 Errichtung des Endlagers	3.1.2 Abfallform und Charakteristika der Materialien	4.1.2 Chemo- und organisch-toxische Stabilität der Spezies
1.1.4 Annahmen (oder Prognosen) für ein Endlager	2.1.3 Einlagerung von Abfall	3.1.3 Charakteristika der Containermaterialien	4.1.3 Anorganische Feststoffe bzw. Lösungen
1.1.5 Annahmen bezüglich zukünftiger menschlicher Aktivitäten	2.1.4 Verschluss und Abdichtung eines Endlagers	3.1.4 Charakteristika der Puffer- und Verfüllmaterialien	4.1.4 Flüchtigkeit der Spezies
1.1.6 Annahmen für zukünftiges menschliches Verhalten (Zielgruppe)	2.1.5 Aufzeichnungen und Kennzeichnung des Endlagers	3.1.5 Abdichtung der Kavernen, Strecken und Schächte	4.1.5 Organische bzw. potenziell organische Spezies
1.1.7 Annahmen zur Dosiswirkung	2.1.6 Abfallzuteilung	3.1.6 Charakteristika anderer technischer Materialeigenschaften	4.1.6 Edelgase
1.1.8 Ziel der Bewertung	2.1.7 Gestaltung des Endlagers	3.1.7 Bedingungen und mechanische Prozesse im Abfall und im System technischer Barrieren (EBS: Engineered Barrier System)	4.2 Freisetzung von Kontaminanten und Migration
1.1.9 Regulatorische Aufgaben und Ausschlüsse	2.1.8 Qualitätssicherung	3.1.8 Hydrologische bzw. hydrogeologische Prozesse und Bedingungen (Abfall und EBS)	4.2.1 Auflösung, Niederschlag und Kristallisation von Kontaminanten
1.1.10 Modell und Ergebnisdaten	2.1.9 Planung und Zeitplan	3.1.9 Chemische bzw. geochemische Prozesse und Bedingungen (Abfall und EBS)	4.2.2 Speziation und Löslichkeit der Kontaminanten
	2.1.10 Administrative Kontrolle am Endlagerstandort	3.1.10 Biologische bzw. biochemische Prozesse und Bedingungen (Abfall und EBS)	4.2.3 Sorptions- und Desorptionsprozesse der Kontaminanten

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

	2.1.11 Überwachung des Endlagers	3.1.11 Thermische Prozesse und Bedingungen (Abfall und EBS)	4.2.4 Kolloide, Mitschleppen und Wechselwirkung der Kontaminanten
	2.1.12 Unfälle und ungeplante Ereignisse	3.1.12 Gasquellen und Auswirkungen (Abfall und EBS)	4.2.5 Chemische Komplexbildung als Transportfaktor der Kontaminanten
	2.1.13 Rückholbarkeit	3.1.13 Strahlungseffekte (Abfall und EBS)	4.2.6 Mikrobielle, mikrobiologische und pflanzenvermittelte Prozesse mit Kontaminanten
	2.2 Geologische Prozesse und Auswirkungen	3.1.14 Kritikalität	4.2.7 Wassergetragener Transport von Kontaminanten
	2.2.1 Tektonik und Orogenese	3.2 Geologische Umgebung	4.2.8 An Festkörper gebundener Transport von Kontaminanten
	2.2.2 Deformation, Elastizität, Plastizität oder Sprödigkeit	3.2.1 Wirtsgestein hinsichtlich der Auffahrung gestörter Zonen	4.2.9 An Gase gebundener Transport von Kontaminanten
	2.2.3 Seisizimität	3.2.2 Charakteristika des Wirtsgesteins	4.2.10 Atmosphärischer Transport von Kontaminanten
	2.2.4 Vulkanismus und Magmatismus	3.2.3 Andere geologische Einheiten	4.2.11 Transport von Kontaminanten an Tieren, Pflanzen und Mikroben
	2.2.5 Metamorphose	3.2.4 Diskontinuität der Geosphäre	4.2.12 Transport von Kontaminanten durch menschliche Handlungen
	2.2.6 Hydrothermale Aktivität	3.2.5 Charakteristika der Transportpfade der Kontaminanten (Geosphäre)	4.2.13 Pfad der Kontaminanten in der Nahrungskette
	2.2.7 Erosion und Sedimentation	3.2.6 Mechanische Prozesse und Bedingungen (Geosphäre)	4.3 Expositionspfade
	2.2.8 Diagenese	3.2.7 Hydraulische bzw. hydrogeologische Prozesse und Bedingungen (Geosphäre)	4.3.1 Konzentrationen in Trinkwasser, Lebensmitteln und Arzneimitteln
	2.2.9 Salzaufstieg	3.2.8 Chemische bzw. geochemische Prozesse und Bedingungen (Geosphäre)	4.3.2 Konzentrationen in der Umwelt
	2.2.10 Hydrologische bzw. hydrogeologische Reaktion auf geologische Veränderungen	3.2.9 Biologische bzw. biochemische Prozesse und Bedingungen (Geosphäre)	4.3.3 Konzentrationen in Non-Food Produkten
	2.3 Klimatische Prozesse und Auswirkungen	3.2.10 Thermische Prozesse und Bedingungen (Geosphäre)	4.3.4 Expositionspfade

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

	2.3.1 Globale Klimaveränderungen	3.2.11 Gasquellen (Geosphäre)	4.3.5 Dosimetrie
	2.3.2 Regionale und lokale Klimaveränderungen	3.2.12 Undetektierte Eigenschaften bzw. Ereignisse (Geosphäre)	4.3.6 Radiologische Toxizität
	2.3.3 Veränderungen des Meeresspiegels	3.2.13 Geologische Ressourcen	4.3.7 Chemotoxizität
	2.3.4 Periglaziale Auswirkungen	3.3 Umgebung an der Oberfläche	4.3.8 Exposition von Radon und seinen Folgeprodukten
	2.3.5 Lokale durch Eisbedeckung (bei Eiszeiten) hervorgerufene Auswirkungen	3.3.1 Topografie und Morphologie	
	2.3.6 Auswirkungen durch warmes Klima (tropisches oder Wüstenklima)	3.3.2 Boden und Sediment	
	2.3.7 Hydrologische bzw. hydrogeologische Reaktion auf Klimaveränderungen	3.3.3 Oberflächennahe Grundwasser führende Schichten	
	2.3.8 Ökologische Reaktion auf Klimaveränderungen	3.3.4 Seen, Flüsse, Wasserläufe und Quellen	
	2.3.9 Menschliche Reaktion auf Klimaveränderungen	3.3.5 Küsten	
	2.4 Zukünftige menschliche Handlungen	3.3.6 Meere	
	2.4.1 Menschlicher Einfluss auf das Klima	3.3.7 Atmosphäre	
	2.4.2 (un) absichtliche menschliche Eingriffe in ein Endlager	3.3.8 Vegetation	
	2.4.3 Untersuchungen des Standortes hinsichtlich des Schutzes vor Eindringen	3.3.9 Tierpopulation	
	2.4.4 Bohraktivitäten (als menschlicher Eingriff)	3.3.10 Meteorologie	

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

	2.4.5 Bergbau oder andere untertägige Aktivitäten (als menschlicher Eingriff)	3.3.11 Grundwasserhaushalt und -bilanz	
	2.4.6 Oberflächenveränderungen durch menschliche Handlungen	3.3.12 Erosion und Ablagerung	
	2.4.7 Wasserwirtschaft (Deiche, Reservoir, Dämme)	3.3.13 Ökologische, biologische und mikrobielle Systeme	
	2.4.8 Soziale und institutionelle Entwicklung	3.4 Menschliches Verhalten	
	2.4.9 Technische Entwicklung	3.4.1 Charakteristika des Menschen (Physiologie, Metabolismus)	
	2.4.10 Wartung des Endlagers	3.4.2 Erwachsene, Kinder, Kleinkinder etc.	
	2.4.11 Explosionen oder Flugzeugabstürze	3.4.3 Ernährungs- und Trinkgewohnheiten	
	2.5 Andere	3.4.4 Sonstiges Verhalten	
	2.5.1 Meteoriteneinschlag	3.4.5 Charakteristika der Gesellschaft	
	2.5.2 Evolution von Menschen, Tieren und Pflanzen	3.4.6 Lebensmittelerzeugung und Wassergewinnung sowie deren Aufarbeitung	
	2.5.3 Andere Phänomene	3.4.7 Wohnungen	
		3.4.8 Wildes, für Landwirtschaft ungenutztes Land und dortige Wassernutzung	
		3.4.9 Landwirtschaftlich genutztes Land und dortige Wassernutzung	
		3.4.10 Land- und Wassernutzung in Städten und Industriestandorten	
		3.4.11 Nutzung der Umwelt für Freizeitaktivitäten etc.	

3.3 Definition der Szenarien der ungestörten Endlagerentwicklung

Das Szenario der ungestörten Entwicklung² beschreibt die bestimmungsgemäße zeitliche Entwicklung des Endlagersystems. Es ist diejenige der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagers, die als die wahrscheinlichste angesehen wird. Das Szenario der ungestörten Entwicklung wird ausgehend von der geologischen Gesamtsituation und dem Endlagerkonzept entwickelt.

Im Folgenden wird für generische Endlager in den drei Wirtsgesteinsformationen Salzgestein, Tonstein und Granit das jeweilige Szenario der ungestörten Entwicklung für den Fall der Endlagerung ausschließlich hochradioaktiver Abfälle dargestellt.

Endlager im Salzgestein

Das Szenario der ungestörten Entwicklung für ein Endlager in Salzgestein ist in Abb. 7 dargestellt und läuft folgendermaßen ab: Innerhalb weniger Jahrzehnte oder Jahrhunderte kommt es durch die Konvergenz zum vollständigen Verschwinden der nach dem Verschluss des Endlagers noch bestehenden restlichen Hohlräume. Der eingebrachte poröse Salzgrusversatz wird so weit kompaktiert, dass er eine ähnlich geringe Permeabilität aufweist wie das ungestörte Salzgestein.

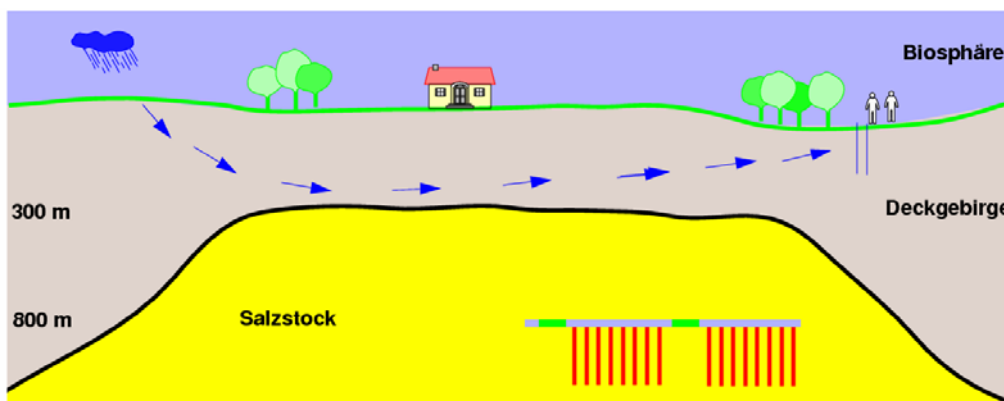


Abb. 7 Szenario der ungestörten Entwicklung eines Endlagers in einem Salzstock

² Anstelle des Begriffs „Szenario der ungestörten Endlagerentwicklung“ wird in deutschen Arbeiten manchmal auch „Szenario des Normalfalls“ o.ä. benutzt. Dieses lehnt sich an das englische „Normal Evolution Scenario“ bzw. das französische „Scenario d’Evolution Normale“ (SEN) an

Schließlich werden die Abfallgebinde vollständig in der Salzformation eingeschlossen und es kommt zu keiner konvektiven Schadstoffausbreitung. Für diesen Fall ist keine langzeitsicherheitsanalytische Ausbreitungsrechnung notwendig.

Da das natürliche Salzgestein und der Versatz nur sehr geringe Mengen Wasser enthalten, sind die anaerobe Behälterkorrosion und damit auch die Gasbildung beschränkt.

Wegen des dichten Einschlusses der Korrosionsgase können sich unter Umständen lokal hohe Gasdrücke aufbauen. Die Möglichkeiten einer Speicherung der Gase unter sicherheitstechnisch zulässigen Druckverhältnissen - wie z. B. das Eindringen der Gase in die Wirtsgestein unter Ausbildung einer Sekundärporosität oder als technische Maßnahme die Bereitstellung langfristig verfügbarer Gasspeichervolumina in einem nicht-kompaktierbaren porösen Versatz - sind Gegenstand aktueller Forschung.

Endlager im Tongestein

Das Szenario der ungestörten Entwicklung eines Endlagers im Tongestein ist in Abb. 8 dargestellt. Bei Tonformationen kommt es im Referenzfall zu einer Grundwasserbewegung durch das Wirtsgestein in den Endlagerbereich. Diese verläuft aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Tonsteins allerdings äußerst langsam. Die Strecken und Hohlräume des Endlagerbergwerks sind im Allgemeinen mit Versatzmaterial verfüllt, das ähnliche Eigenschaften wie das Wirtsgestein aufweist, wie z. B. Bentonit oder Bentonit-Sand-Gemische. Im Stoßbereich ist das Wirtsgestein durch die bei der Auffahrung der Strecken im Stoßbereich auftretenden Zugspannungen aufgelockert und, als Folge der Austrocknung durch Bewetterung mit Frischluft in der Betriebsphase teilweise entsättigt. Bei einem Zutritt von Wasser in das Nahfeld werden der aufgelockerte Gebirgsbereich und der Versatz in den Strecken und Hohlräumen wieder vollständig aufgesättigt. Durch die Aufsättigung quillt der eingebrachte Versatz, was in Verbindung mit dem Gebirgsdruck zur Verheilung der Risse in der Auflockerungszone führt, sodass sich dort mit der Zeit wieder die niedrigen hydraulischen Durchlässigkeiten des ungestörten Wirtsgesteins einstellen.

Die Menge des zutretenden Wassers reicht aus, um die Behälter im Laufe der Zeit vollständig zu korrosiv zu zersetzen. Dadurch kommt es zum Ausfall der Behälter und zur Auflösung der Abfallmatrix und schließlich zu einer Mobilisierung der Radionuklide.

Ein Teil diese Radionuklide kann im Nahfeld bei einem Überschreiten der Löslichkeitsgrenzen wieder ausgefällt und dadurch wieder immobilisiert werden.

Die mobilisierten Radionuklide werden praktisch ausschließlich diffusiv durch die technischen Barrieren, das Wirtsgestein und weiter in das Deckgebirge transportiert. Der advective Transport durch die technischen Barrieren und das Wirtsgestein ist wegen deren geringer Durchlässigkeit sehr langsam und spielt keine Rolle. Eine merkliche Rückhaltung der Schadstoffe wird zunächst durch Sorption an den Versatzmaterialien und anschließend in hohem Maße durch Sorption des Wirtsgesteins bewirkt. Der Radionuklidtransport im Deckgebirge erfolgt advektiv mit dem Grundwasser. Infolge der Kontamination des Grundwassers kommt es bei dessen Nutzung als Trinkwasser oder zur Erzeugung von Lebensmitteln zu einer potenziellen Strahlenexposition der Bevölkerung.

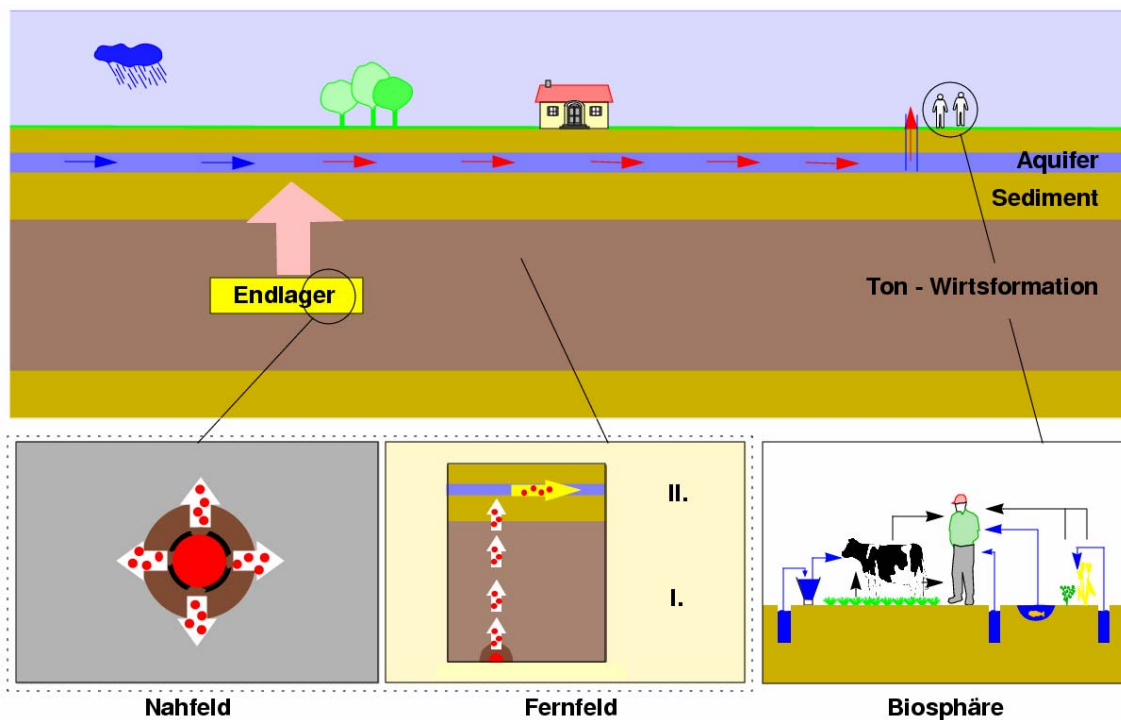


Abb. 8 Szenario der ungestörten Entwicklung eines Endlagers im Tongestein

Durch die vollständige Korrosion der Behälter können in einem Endlager im Tonstein große Gasmengen produziert werden. Nach aktuellem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass das gebildete Gas nach Überschreiten eines Schwellenwertes, dem sogenannten Gaseindringdruck, in das Wirtsgestein eindringt und dort gespeichert wird.

Endlager im Granit

Das Szenario der ungestörten Entwicklung eines Endlagers im Granit ist in Abb. 9 dargestellt. In Granitformationen ist grundsätzlich mit dem Vorhandensein von Klüften zu rechnen. Daher wird davon ausgegangen, dass Wasser durch die Klüfte in die Einlagerungsbereiche eintritt und die Bentonitauskleidung der Behälter - den sogenannten Bentonitbuffer³ - im Nahfeld aufsättigt. Da der Wasserzutritt nicht begrenzt ist, kommt es zur vollständigen Korrosion der Behälter und zur Mobilisierung der Radionuklide. Ein Teil der gelösten Radionuklide im Nahfeld kann bei einem Überschreiten der Löslichkeitsgrenzen wieder ausgefällt und dadurch immobil werden.

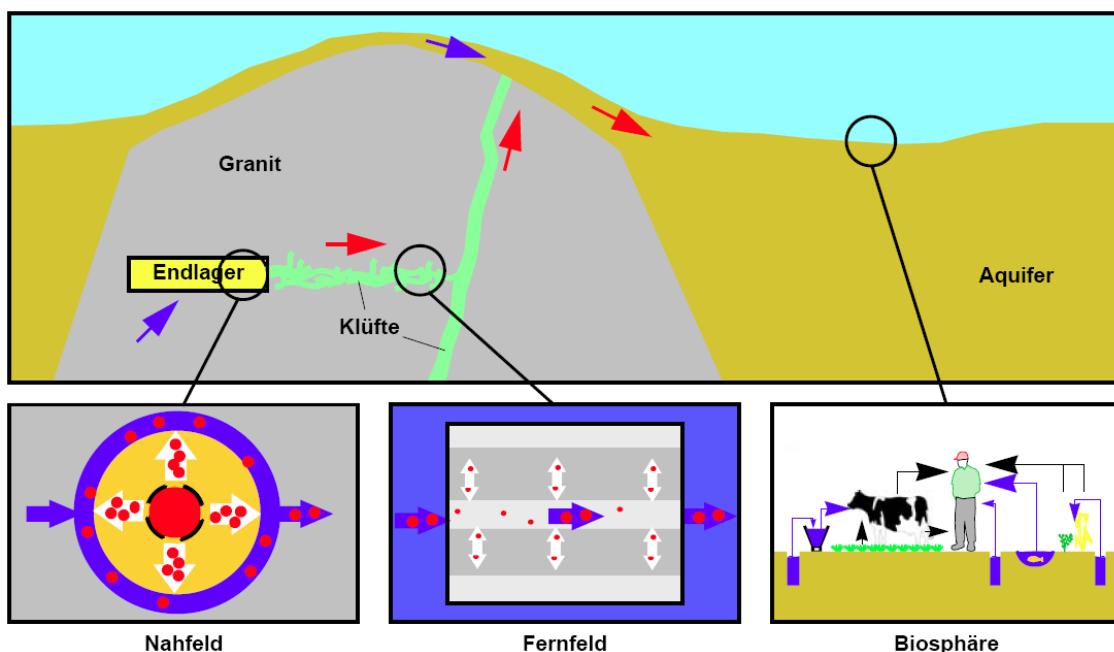


Abb. 9 Szenario der ungestörten Entwicklung eines Endlagers im Granit

Die mobilisierten Radionuklide werden diffusiv durch den Bentonitbuffer transportiert und in Klüften der Granitformation freigesetzt. In den Klüften werden die Radionuklide durch Advektion transportiert. Sie können hierbei durch Matrixdiffusion und Sorption in der Gesteinsmatrix sowie an eventuell vorhandenen Klüftbelägen oder -füllungen zurückgehalten werden. Durch die Kontamination des Grundwassers kommt es bei dessen Nutzung als Trinkwasser oder zur Erzeugung von Lebensmitteln zu einer potenziellen Strahlenexposition der Bevölkerung.

³ Als „Bentonitbuffer“ wird die Einbettung der Abfallgebinde im Endlager bezeichnet, die aus Bentonitformsteinen besteht, die die Abfälle umschließen

Die in den Einlagerungsbereichen gebildeten Gase können, bei einer Überschreitung des Gaseindringdrucks für den Bentonit durch den Bentonit entweichen und durch die Klüfte in der Formation abtransportiert werden. Die Gastransportpfade im Bentonit verschließen sich wieder, sobald der Gasdruck den Gaseindringdruck wieder unterschreitet, sodass keine dauerhafte Schädigung des Bentonitbuffers auftritt.

3.4 Zu berücksichtigende alternative Szenarien

Neben dem Szenario der ungestörten Entwicklung müssen in einer Langzeitsicherheitsanalyse auch bestimmte alternative Szenarien berücksichtigt werden. In diesen Szenarien werden Entwicklungen des Endlagersystems beschrieben, die in einem oder mehreren Punkten vom erwarteten Verlauf des Szenarios der ungestörten Entwicklung abweichen. Diese alternativen Entwicklungen können alle Kompartimente⁴ des Endlagersystems - Nahfeld, Fernfeld und Biosphäre - betreffen.

Das Vorgehen bei der Auswahl der relevanten Szenarien für ein Endlagerprojekt wurde in Kap. 3.2.3 dargestellt. Im Folgenden sollen einige wichtige alternative Szenarien kurz beschrieben werden.

Nichtbestimmungsgemäße Entwicklung eines Endlagers im Steinsalz

Nach den Ausführungen im Kap. 3.3 ist bei einem Endlager in Salzgestein unter ungestörten Bedingungen nicht mit einem Zutritt von Wasser zu den Abfällen und einer Schadstofffreisetzung zu rechnen. Jedoch können Störungen auftreten, die alternative Entwicklungen zur Folge haben, wie einen Zutritt von Wasser zu den Abfällen. In dem bereits in der Abb. 4 auf S. 12 dargestellten typischen Störfallszenario wird angenommen, dass zu einem frühen Zeitpunkt nach dem Verschluss des Endlagers Wasser aus dem Deckgebirge und/oder aus Lösungseinschlüssen im Gebirge zutreten.

Die zutretende Lösung kommt mit den Abfallgebinden in Kontakt, korrodiert die Behälter, gelangt an die radioaktiven Abfälle und wird dabei kontaminiert. Sobald die im Endlager noch verbliebenen Resthohlräume vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sind, kehrt sich die Richtung des Fluidstroms infolge der Hohlräumkonvergenz um. Die kontaminierte Lösung wird dann aus dem Endlager in das Deckgebirge ausgepresst und

⁴ „Kompartimente“ sind Teilbereiche eines Endlagersystems. Bei einem Endlager im Granit sind das beispielsweise die Abfallmatrix, der Behälter, der Versatz, die Wirtsfornation, das Deckgebirge

In Langzeitsicherheitsanalysen werden daher Szenarien mit den Ereignissen behandelt, dass ein Endlagerbehälter oder ein Endlagerbereich, in den bereits Radionuklide eingedrungen sind, bei der Suche nach in oder unter der Wirtsgesteinsformation vermuteten Bodenschätzen von einer oder mehreren Erkundungsbohrungen durchteuft wird. Die in Betracht zu ziehenden Auswirkungen sind zum einen die durch die Schaffung der zusätzlichen Wegsamkeit ermöglichte bzw. beschleunigte Radionuklidenausbreitung und zum anderen die direkte Auswirkung durch die Förderung kontaminierten Bohrguts an die Erdoberfläche. Weitere mögliche Szenarien zur menschlichen Einwirkung sind bei Endlagern im Salzgestein das Auffahren eines Gewinnungsbergwerks in der Salzformation oder die Solung einer Speicherkaverne /SKR 05/.

Gaspfad

Unter dem Gaspfad versteht man die Ausbreitung von gasförmigen Radionukliden in einer Gasphase oder in gelöster Form in einer Flüssigphase. Dies betrifft zum einen radioaktive Gase, die in einem Endlager vorkommen können, wie z. B. Kohlendioxid, welches das radioaktive Kohlenstoffisotop C-14 enthält. Zum anderen können beim radioaktiven Zerfall bestimmter gelöster Radionuklide während ihres Transports gasförmige Tochternuklide entstehen. Dies findet zum Beispiel statt beim Zerfall von Radium-226 in Radon-222.

Streng genommen ist der Gaspfad eigentlich ein FEP im Referenzszenario für jedes Endlager. Aufgrund der aufwendigen Modellierung von Zweiphasen-Strömungen wurde der Gaspfad in den meisten Sicherheitsanalysen aber in separaten alternativen Szenarien betrachtet, weswegen er hier als zusätzliches Szenario erwähnt wird. Ist der Gaspfad nicht im Referenzszenario enthalten, muss er in einer Langzeitsicherheitsanalyse in jedem Fall in einem zusätzlichen Szenario berücksichtigt werden.

Subrosion

Als Subrosion wird ein geologischer Prozess bezeichnet, bei dem lösliche Gesteine durch Grundwässer aufgelöst werden. Subrosion findet vor allem bei einem Salzaufstieg statt und führt zur Ausbildung eines sogenannten Hutgesteins, das aus den gering löslichen Bestandteilen einer Salzformation besteht. Der Salzaufstieg kann auch zu einer langsamen Verringerung der Teufenlage eines in diesem Salzgestein errichteten Endlagerbergwerks führen, wenn entweder Teile des Deckgebirges oder des Wirtsgesteins allmählich abgetragen werden. Der Abstand zwischen Endlager und Ge-

ländeoberfläche wird sich durch die Subrosion kontinuierlich verringern, bis das Endlagerniveau schließlich nach geologischen Zeiträumen das Grundwasser oder sogar die Geländeoberfläche erreichen kann.

Klimatische Entwicklungen

In den Referenzszenarien wird meistens unterstellt, dass die heutigen klimatischen Verhältnisse am Standort unverändert über den gesamten Nachweiszeitraum andauern. Da jedoch die bisher aufgetretenen zyklischen Veränderungen des Erdklimas mit Kalt- und Warmzeiten auch in der Zukunft zu erwarten sind, müssen die Auswirkungen der Klimaschwankungen, vor allem von Eiszeiten, in besonderen Szenarien berücksichtigt werden. Den Ablauf einer Eiszeit und die damit verbundenen geologischen und hydrogeologischen Änderungen zeigt Abb. 11 für das Beispiel des schwedischen Endlagers /MOR 01/.

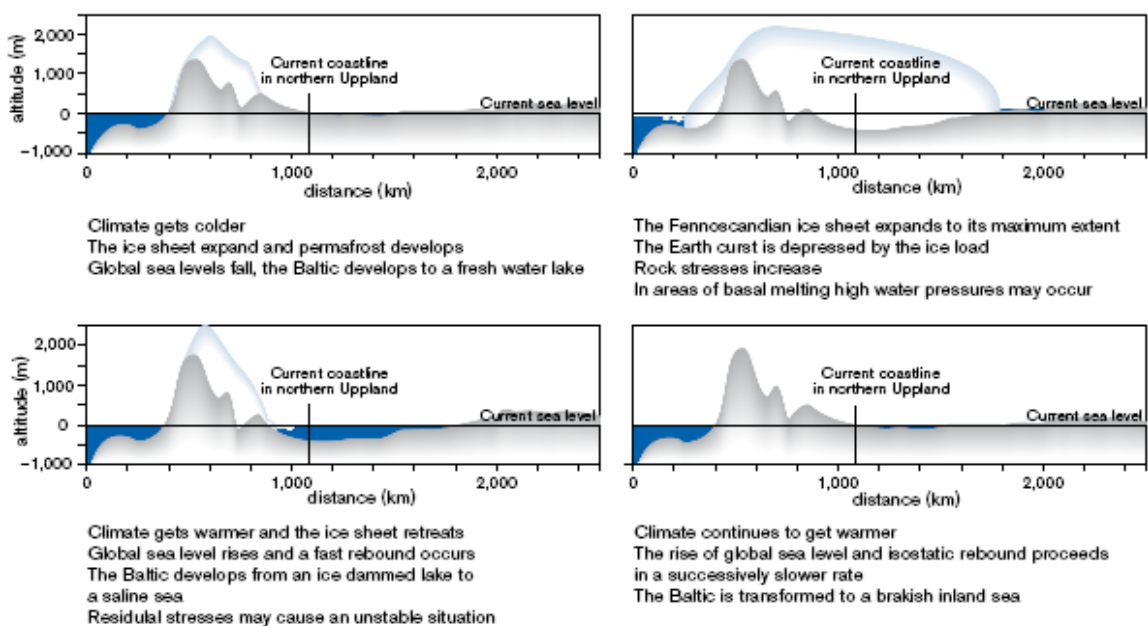


Abb. 11 Ablauf der Ereignisse während einer Eiszeit in Schweden, dargestellt an einem Schnitt von der norwegischen Nordseeküste nach Osten /SKB 06/

Direkte Auswirkungen zukünftiger Eiszeiten sind vor allem

- Änderungen des hydrostatischen und petrostatischen Drucks im Endlager,
- Kluffbildung in nicht-plastischen Gesteinsformationen,
- Entstehung von Permafrostzonen,

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- Veränderungen der Küstenlinien infolge Änderung des Meeresspiegels,
- Änderungen in der Biosphäre, wie Niederschlag, Nahrungsmittelangebot und Verzehrgewohnheiten.

Weitere geologische Ereignisse

Szenarien mit weiteren geologischen Ereignissen, wie vulkanische Aktivitäten oder Erdbeben, müssen grundsätzlich in die Sicherheitsbetrachtung einbezogen werden. Diese Szenarien werden aber normalerweise schon bei der Auswahl des Standorts berücksichtigt. Im Sicherheitsnachweis muss dann die geringe Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Szenarien belegt werden, sodass deren Folgen nicht betrachtet werden müssen.

4 Langzeitsicherheitsanalytische Untersuchungen

Die Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager für radioaktive Abfälle befasst sich mit den möglichen Ursachen und Abläufen einer Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager sowie deren Auswirkungen auf zukünftige Individuen.

Vorgänge, die den Radionuklidtransport ermöglichen oder beeinflussen können, laufen oft sehr langsam ab und erstrecken sich über Tausende von Jahren. Außerdem handelt es sich bei einem Endlager um ein großräumiges System, das als Ganzes nicht getestet werden kann. In Anbetracht dieser Zeiträume und der Komplexität eines Endlagersystems ist es nicht möglich, die Konsequenzen der betrachteten Szenarien in Simulationsexperimenten direkt zu ermitteln.

Stattdessen müssen diese Vorgänge auf der Basis des theoretischen Kenntnisstandes und unter Berücksichtigung experimenteller Detailergebnisse vereinfachend in mathematischen Modellen nachgebildet werden. Die Vielzahl der zu berücksichtigenden physikalischen und chemischen Vorgänge führt zu Systemen gekoppelter Differenzialgleichungen, die in der Regel nicht analytisch gelöst werden können. Die numerische Auswertung der beschreibenden Gleichungssysteme erfolgt mit Hilfe von Computerprogrammen.

Der Nachweis, dass das wesentliche Schutzziel der Endlagerung - dass die Strahlenexposition in der Biosphäre im Nachweiszeitraum einen festgelegten Wert nicht überschreitet - eingehalten wird, erfordert eine Berechnung der zeitabhängigen Individualdosis für die relevanten Szenarien als Endergebnis der Langzeitsicherheitsanalyse. Zur Behandlung der verschiedenen physikalischen und chemischen Prozesse, welche die Größe der Strahlenexpositionen in der Biosphäre beeinflussen können, stehen unterschiedliche Rechenprogramme zur Verfügung, die sich in zwei Kategorien unterteilen lassen:

- Programme der ersten Kategorie dienen zur detaillierten Untersuchung einzelner Prozesse oder Komponenten des Endlagersystems mit dem Ziel der Interpretation von experimentellen Ergebnissen oder der Absicherung von Annahmen und Modellen. Darüber hinaus werden mit diesen Programmen einige Eingangsdaten für die Programme der zweiten Kategorie berechnet.

- Programme der zweiten Kategorie dienen zur Berechnung des Radionuklidtransports aus dem Endlager in die Biosphäre und der resultierenden Strahlenexposition unter Berücksichtigung aller relevanten Einzelprozesse.

Die Ermittlung vieler Eingangsdaten für die Programme beider Kategorien sowie die Validierung der verwendeten Modellansätze erfolgt in Labor- und In-situ-Experimenten.

Programme, mit denen Eingangsdaten berechnet werden, sind z. B. solche für die Berechnung des Abbrands von Brennelementen und des Aktivitätstransports in den verschiedenen Nahrungsketten. Als Ergebnisse liefern diese Programme das Aktivitätsinventar eines abgebrannten Brennelementes bzw. nuklidspezifische Dosiskonversionsfaktoren⁶.

Mit den Programmen der zweiten Kategorie werden für vorgegebene Szenarien die potenzielle Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager und die daraus resultierende potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre ermittelt. Die Ergebnisse der Programme der ersten Kategorie fließen mittelbar über Annahmen und unmittelbar über Modellansätze und Eingangsdaten in die Programme der zweiten Kategorie ein, die somit eine Synthese der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Strahlenexposition darstellen. Die Programme zur Berechnung der Radionuklidenausbreitung enthalten als wesentliche Bestandteile Module für die drei Hauptkomponenten eines Endlagersystems:

- Nahbereich oder Endlager,
- Geosphäre oder Deckgebirge,
- Biosphäre.

Da die in den drei Hauptkomponenten ablaufenden Vorgänge oftmals unterschiedlich sind und unter anderem mit verschiedenen numerischen Verfahren bearbeitet werden, sind die zugehörigen Module weitgehend eigenständig. Bei einer Modellierung des gesamten Endlagersystems mit dem Ziel der Berechnung der Strahlenexposition werden die Module für die drei Hauptkomponenten sequenziell abgearbeitet.

⁶ Der Begriff wird in Abschnitt 4.4 näher erläutert

Die Programme der zweiten Kategorie müssen eine hohe Flexibilität in ihrem Aufbau aufweisen, um einen leichten Austausch von Unterprogrammen zu ermöglichen. Zum einen ist die Auswahl der Vorgänge, die in den Teilsystemen modelliert werden müssen, standort- und konzeptspezifisch: sie wird vom Wirtsgestein, dem technischen Einlagerungskonzept und dem betrachteten Szenario beeinflusst. Je nach Anforderung müssen solche Programme neu entwickelt oder bereits verfügbare Programme an die aktuelle Aufgabenstellung angepasst werden. Wichtige Bestandteile solcher Programme sind außerdem auch Werkzeuge zur Durchführung statistischer Analysen und zur Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse.

Abb. 12 zeigt beispielhaft ein Programmsystem, mit dem sich derartige Berechnungen der Strahlenexposition oder anderer Sicherheitsindikatoren für verschiedene Wirtsgesteins- und Deckgebirgstypen durchführen lassen. Die einzelnen Module für die Teilsysteme Endlager (rot) können über geeignete Schnittstellen jeweils Ergebnisse in Form von Radionuklid-Massenströmen oder -Konzentrationen an eines der Module für das Deckgebirge (gelb) oder für die Biosphäre (grün) übergeben und so je nach Aufgabenstellung (Schutzzeileinhaltung, Robustheit, Sensitivität, Probabilistik, s. u.) in geeigneter Weise kombiniert werden. Beispielsweise kann mit einer Kopplung der Module „LOPOS“, „CHETMAD“ und „EXCON“ die Strahlenexposition in der Biosphäre für ein Endlager in einem Salzstock mit einem geklüftet-porösen Deckgebirge berechnet werden.

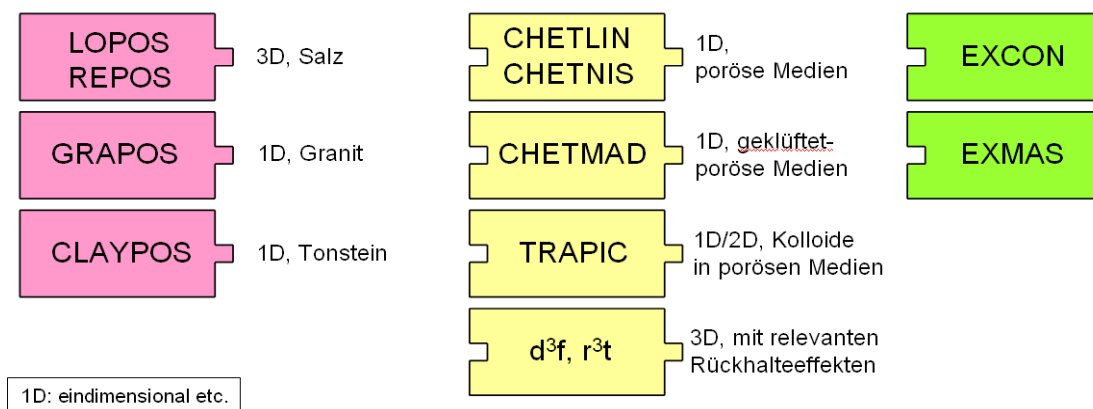


Abb. 12 Modulares Programmsystem für numerische Langzeitsicherheitsanalysen

4.1 Quellterm und Mobilisierung

Der FEP „Radionuklid-Quellterm“ ist in den meisten Szenarien enthalten, die eine Radionuklidenausbreitung beinhalten, wie auch in dem in Abb. 4 auf Seite 12 dargestellten Szenario „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“. Die Abb. 13 stellt diesen FEP ausführlicher im Zusammenhang mit anderen FEP dar, die mit diesem in Wechselwirkung stehen. Voraussetzung für das Eintreten dieses FEP ist das Ereignis „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“, welches hier rosa gekennzeichnet ist, siehe auch Abb. 4. In Abb. 13 wird auch gezeigt, welche weiteren FEP die auslösenden FEP beeinflussen (grüne Pfeile) und welche FEP als Voraussetzung vorhanden sein müssen (rote Pfeile). Müssen mehr als eine Voraussetzung für das Eintreten eines anderen FEP gleichzeitig erfüllt sein, sind die entsprechenden Verbindungen durch einen einzigen Pfeil dargestellt.

Die FEP in den einzelnen Feldern in Abb. 13 können je nach Komplexität der betreffenden Prozesse und ihrer Modellierung entweder durch einfache Gleichungen beschrieben werden, wie z. B. die „Sorption an Korrosionsprodukten“ entsprechend Gl. (21) nach Henry, oder sie sind ihrerseits wiederum durch weitere FEP bestimmt, wie z. B. der FEP „Gasbildung“ (siehe Abb. 14). Schließlich werden alle FEP soweit aufgelöst, dass sie durch mathematische Gleichungen beschrieben werden können. Damit erhält man ein System aus vielen miteinander gekoppelten Differenzialgleichungen, die nur numerisch gelöst werden können. Dazu müssen die entsprechenden Computerprogramme oder Programmmodule erstellt werden.

Die Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfallgebinden ergibt sich aus der Überlagerung von drei erst nach dem Lösungszutritt einsetzenden Prozessen: dem Behälterausfall, der Korrosion der Abfallmatrix und der Freisetzung aus der Abfallmatrix, die in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben werden. Diese Prozesse werden von mehreren, zum Teil miteinander gekoppelten chemischen Prozessen kontrolliert oder beeinflussen deren Ablauf.

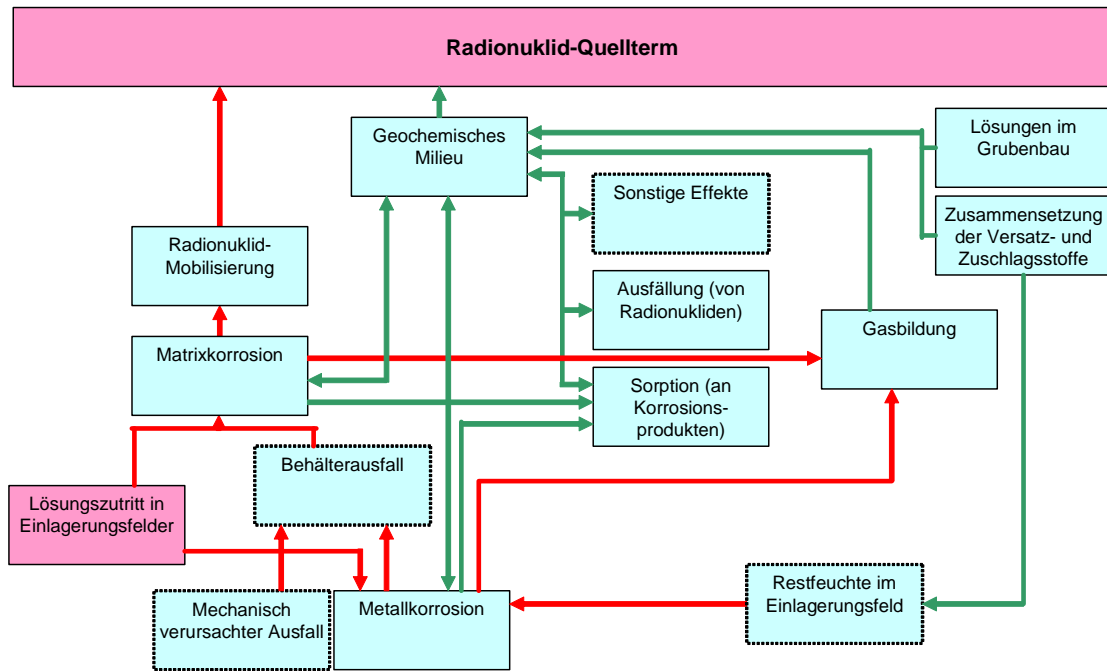


Abb. 13 FEP „Radionuklid-Quellterm“ /GRS 08/

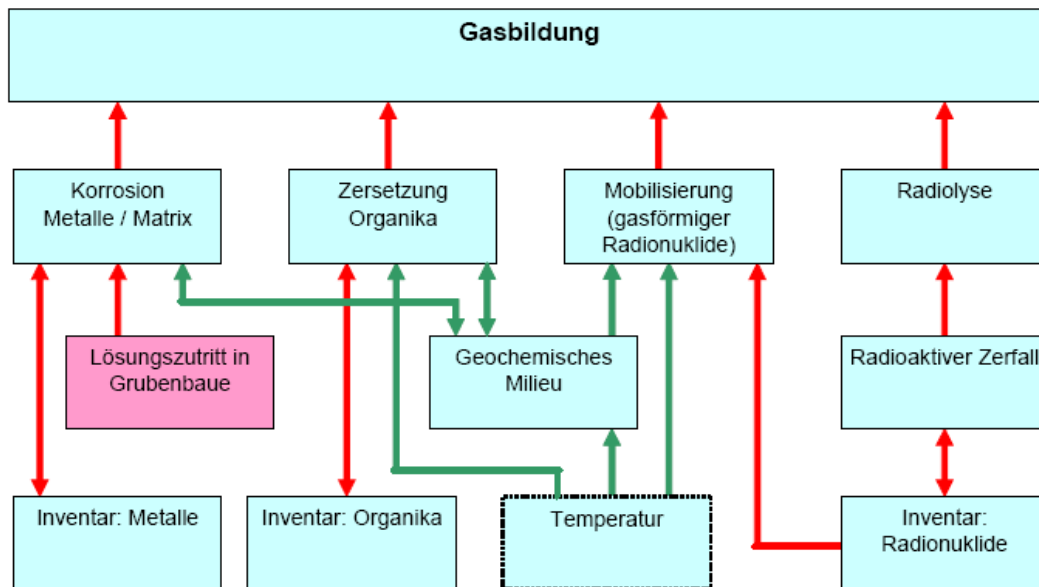


Abb. 14 FEP „Gasbildung“ /GRS 08/

4.1.1 Behälterausfall

Wie aus Abb. 13 hervorgeht, kann der Behälter durch mechanische Einwirkungen oder Korrosion nach einem Flüssigkeitszutritt seine Rückhaltefunktion verlieren. Nach dem

Verschluss des Endlagers befinden sich darin Abfallbehälter verschiedener Typen in jeweils höheren Stückzahlen. Der Ausfallszeitpunkt eines bestimmten Behälters ist eine Zufallsgröße, die nicht exakt vorhergesagt werden kann. Wegen der großen Anzahl der Behälter kann der Ausfallzeitpunkt der Behälter eines Typs durch eine Verteilungsfunktion der Lebensdauer beschrieben werden. Für die Lebensdauer kann dabei ein einzelner, für alle Behälter gleicher Wert oder eine Verteilungsfunktion in Form einer Gleichverteilung, Exponentialverteilung oder einer Normalverteilung angenommen werden. Mit der Verteilungsfunktion wird der Anteil der zu einem bestimmten Zeitpunkt ausgefallenen Behälter berechnet. Der Bezugszeitpunkt ist dabei der Zeitpunkt, an dem die Korrosion der Behälter einsetzt, und der je nach Wirtsgestein entweder durch einen Zutritt von Wasser oder durch Beginn der Nachbetriebsphase bestimmt ist.

Eine gleichverteilte Lebensdauer der Behälter wird angenommen, wenn den Behältern nur eine eingeschränkte Barrierewirkung zugewiesen wird und diese z. B. dem Gebirgsdruck nicht standhalten. Der Anteil ausgefallener Behälter steigt linear von 0 zu Beginn der Behälterausfallphase bis auf 1 bei der maximalen Behälterlebensdauer an. Die maximale Lebensdauer ist bei einer Gleichverteilung doppelt so groß wie die mittlere Lebensdauer der Behälter. Für die langen Lebensdauern dickwandiger Behältertypen, deren zukünftiges Ausfallverhalten unabhängig von der Vorgeschichte ist, werden Exponentialverteilungen angenommen. Existiert jedoch ein bevorzugter Behälterausfallszeitpunkt für spätere Zeitpunkte, wird eine Normalverteilung der Behälterlebensdauer angenommen, die durch einen Mittelwert und eine Standardabweichung für die Lebensdauer der Behälter charakterisiert ist.

Eine konservative Modellierung ist die Annahme des gleichzeitigen Ausfalls aller Behälter zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dabei ist der früheste Zeitpunkt zu wählen, zu dem die Behälter ausfallen können. Dies wurde z. B. in den Studien SPA /LÜH 00/ und im Projekt Opalinuston /SCH 02/ durchgeführt. Für schwachradioaktive Abfälle, deren Behälter keine Barrierewirkung haben, kann ein gleichzeitiger Ausfall aller Behälter unmittelbar am Beginn der Nachbetriebsphase angenommen werden.

4.1.2 Freisetzung aus der Abfallmatrix

Die Korrosion der Abfallmatrix und die resultierende Freisetzung werden im Allgemeinen durch eine so genannte effektive Mobilisierungsrate ausgedrückt. Die Mobi-

lisierungsrate gibt den Anteil der Matrix an, der pro Jahr korrodiert wird, bzw. der Kehrwert der Mobilisierungsrate entspricht der Zeit, nach der die gesamte Matrix aufgelöst ist.

Zur Darstellung der Mobilisierung der Radionuklide aus einer Glasmatrix wird die inkongruente Glasauflösung modelliert. Bei der inkongruenten Glasauflösung entstehen bei der Auflösung neue Feststoffe durch Ausfällung. Die effektive Mobilisierungsrate μ ergibt sich dann aus:

$$\mu = \frac{O_{eff} \cdot j}{m} \quad (1)$$

mit der effektiven Oberfläche der Glasmatrix O_{eff} und der Masse der Glasmatrix m .

Für die Beschreibung der Mobilisierung aus abgebrannten Brennelementen wird das Gesamtinventar der Brennelemente in elementspezifische relative Anteile auf drei Bereiche aufgeteilt: die Metallteile, das Gasplenum und die Brennstoffpellets. Für alle drei Bereiche werden unabhängige, konstante Mobilisierungsraten festgelegt. Der Aktivitätsstrom aus jedem der Bereiche ergibt sich aus dem Produkt der Mobilisierungsrate und dem Aktivitätsinventar. Der Gesamtaktivitätsstrom ergibt sich aus der Summe der Teilströme aus den drei Bereichen.

Die mobilisierten Radionuklide werden in das begrenzte Flüssigkeitsvolumen innerhalb des Behälters freigesetzt und führen dort zu einer Konzentrationserhöhung. Falls die Rate der Freisetzung aus dem Behälter und der Transport durch das Nahfeld langsamer sind als die Mobilisierungsrate, steigt die Konzentration so lange an, bis ggf. die elementspezifische Löslichkeitsgrenze eines Radionuklids erreicht ist. In diesem Fall führt dies zur Bildung von sekundären Phasen und die Mobilisierung der betreffenden Elemente kommt somit effektiv zum Erliegen.

4.1.3 Auswahl der langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide

In einer Langzeitsicherheitsanalyse können aus dem Gesamtspektrum der Radionuklide diejenigen unberücksichtigt bleiben, deren Relevanz zweifelsfrei ausgeschlossen werden kann. Die Vorgehensweise zur Auswahl der langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide ist in /STO 85a/ beschrieben. Dabei ist zwischen Spalt- und Aktivierungsprodukten und Aktiniden zu unterscheiden. Für die Langzeitsicherheits-

analyse sind bei den Spalt- und Aktivierungsprodukten drei Sorten von Radionukliden relevant:

- Radionuklide, die zum Zeitpunkt der Einlagerung in radiologisch bedeutsamen Mengen vorliegen und eine ausreichend hohe Halbwertszeit haben, um aus dem Endlager transportiert werden zu können (z. B. Tc-99, Halbwertszeit 210.000 Jahre; Ni-59, Halbwertszeit 75.000 Jahre),
- Radionuklide, die zwar zum Zeitpunkt der Endlagerung gar nicht oder in geringen Mengen vorhanden sind, die aber durch den Zerfall von Mutternukliden gebildet werden (z. B. Aktiniden am Ende einer Zerfallsreihe wie Ra-226) und dadurch radiologisch bedeutsam werden und
- Radionuklide, die zum Zeitpunkt der Endlagerung vorhanden sind und die durch ihren Zerfall die Wärmeentwicklung oder Gasbildung beeinflussen (z. B. Sr-90).

Die Auswahl der Radionuklide der ersten beiden Kategorien erfolgt über die radiologisch (und eventuell auch zeitlich) gewichtete Aktivität der Radionuklide zu einem Zeitpunkt oder in einem Zeitintervall. Bei der Bewertung der Relevanz von langlebigen Radionukliden im Hinblick auf ihre Wärmeleistung wird davon ausgegangen, dass diese Radionuklide bereits wegen ihrer radiologischen Relevanz berücksichtigt werden. Diese Annahme ist berechtigt, da sowohl der Wärmekonversionsfaktor als auch der Dosisfaktor der Zerfallsenergie proportional sind und sich somit ähnlich verhalten. Daher müssen für die dritte Gruppe nur einige kurzlebige Radionuklide betrachtet werden.

In /BUH 91/ wurden die relevanten Radionuklide für die direkte Endlagerung von abgebranntem Brennstoff ermittelt und diese drei Prioritätsbereichen zugeordnet. Die radiologisch relevanten Spalt- und Aktivierungsprodukte des obersten Prioritätsbereichs sind danach: C-14, Ni-59, Ni-63, Se-79, Rb-87, Sr-90, Mo-93, Zr-93, Nb-94, Tc-99, Pd-107, Sn-126, J-129, Cs-135, Cs-137, Sm-147 und Sm-151. Aufgrund des Kriteriums der Wärmeleistung kommen Co-60 und Eu-154 hinzu.

Bei den Aktiniden müssen alle vier Zerfallsreihen⁷ betrachtet werden, wobei aber einzelne Nuklide nach bestimmten Kriterien vernachlässigt werden können. Diese Krite-

⁷ Folge von Radionukliden, die nacheinander durch Alpha- und Beta-Zerfälle gebildet werden. Die Zerfallsreihen sind charakterisiert durch die Massenzahlen der sukzessive gebildeten Radionuklide. Die Zerfallsreihen enden mit der Bildung eines stabilen Bleisotops. Es gibt die Thorium-Reihe (4n) mit dem Th-

rien richten sich nach der Halbwertszeit des betrachteten Radionuklids im Verhältnis zu dessen Mutter- bzw. Tochternukliden:

- Radionuklide am Anfang einer Zerfallsreihe werden vernachlässigt, wenn ihre Halbwertszeit geringer und ihre Masse um mehr als einen Faktor 100 kleiner als die des nachfolgenden Nuklids ist,
- Radionuklide in der Mitte einer Zerfallsreihe werden vernachlässigt, wenn ihre Halbwertszeit kleiner als 1 Jahr ist und
- Radionuklide am Ende einer Zerfallsreihe werden vernachlässigt, wenn ihre Halbwertszeit kleiner als 25 Jahre ist.

Die Zahl der möglicherweise relevanten Radionuklide in den Zerfallsreihen kann durch diese Kriterien auf 26 eingegrenzt werden /BUH 91/.

4.2 Radionuklidtransport im Nahfeld des Endlagers

Der Radionuklidtransport im Nahfeld eines Endlagers beginnt am Zeitpunkt des Behälterausfalls und der Mobilisierung der Radionuklide. Die Radionuklide können in gelöster Form über die Wasserphase („Transport über den Wasserpfad“) oder über die Gasphase („Transport über den Gaspfad“) transportiert werden.

Der FEP „Radionuklidtransport“, in dem die Ausbreitung der Radionuklide von den eingelagerten Abfällen bis in einen oberflächennahen Grundwasserleiter in der Biosphäre beschrieben wird, kommt (z. B. im Szenario „Lösungszutritt“, siehe die Abb. 4) erst zum Tragen, wenn der in Kapitel 4.1 beschriebene FEP „Radionuklid-Quellterm“ aktiv ist, d. h. der Radionuklidtransport im Nahfeld setzt erst nach der Freisetzung der Radionuklide aus den Abfallgebinden ein, siehe Abb. 15. Der Transport über den Wasserpfad kann diffusiv oder advektiv erfolgen, wobei die Radionuklidausbreitung außerdem durch Dispersionseffekte mitgeprägt werden kann.

Im Folgenden wird das Nahfeld eines Endlagers für die drei Wirtsgesteine Salzgestein, Tonstein und Granit beschrieben.

232, die Neptunium-Reihe ($4n+1$) mit dem Np-237, die Uran/Radium-Reihe ($4n+2$) mit dem U-238 und die Uran/Actinium-Reihe ($4n+3$) mit dem Pu-239 und dem U-235.

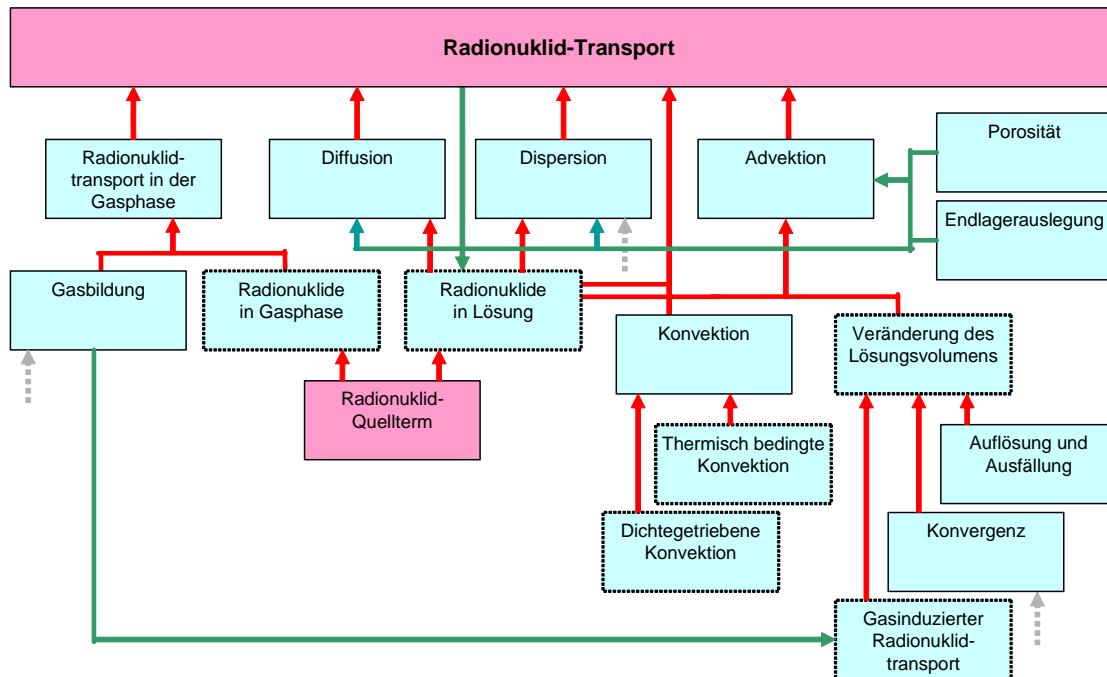


Abb. 15 FEP Radionuklidtransport /GRS 08/

4.2.1 Salzgestein

Bei einer Konsequenzenanalyse der vorgegebenen Szenarien für ein Endlager in einer Salzformation wird eine orts- und zeitdiskrete Modellierung des Radionuklidtransports durchgeführt. Bei der Modellierung eines Endlagers im Salzgestein wird meistens unter dem Nahfeld der Bereich verstanden, der das gesamte Grubengebäude und den umgebenden aufgelockerten Teil des Wirtsgesteins umfasst. Für die Modellierung wird das Endlager in Teilbereiche wie z. B. Kammern, Strecken oder Verschlüsse mit jeweils homogenen Eigenschaften unterteilt. Im Programmpaket EMOS⁸ /STO 96/ wird der Transport im Nahfeld eines Endlagers im Salz mit dem Modul LOPOS⁹ modelliert. Im Nahfeld sind für die Szenarien mit einem unterstellten Lösungszutritt folgende Transport- und Rückhalteprozesse zu berücksichtigen:

⁸ Akronym für „Endlagerbezogene Modellierung von Szenarien“ als Bezeichnung des Programmpakets der GRS zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen

⁹ EMOS-Programmodul für die Modellierung netzwerkartiger dreidimensionaler Endlager-Grubengebäude

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- Advektion,
- advective Verdrängung durch Konvergenz und/oder Gasproduktion,
- Diffusion,
- Dispersion,
- Konvektion,
- Ausfällung,
- Sorption,
- radioaktiver Zerfall.

Daneben werden Eigenschaften und Prozesse berücksichtigt, die auf den Radionuklidtransport Einfluss haben:

- Temperatur und Temperaturgradienten im Grubengebäude,
- Konvergenz der Grubenhohlräume,
- Permeabilität und Strömungswiderstand von Verschlüssen, Dämmen und Versatz,
- Fluiddruck,
- Gasproduktion.

Der advective Lösungsstrom S durch eine Wegsamkeit infolge eines Druckgradienten Δp ergibt sich nach dem Darcy-Gesetz:

$$S = R^{-1} \cdot \Delta p. \quad (2)$$

Der Strömungswiderstand R hängt unter anderem von der Viskosität der Lösung ab, deren Zusammensetzung sich innerhalb eines Endlagers aufgrund von Umlösungsprozessen ändern kann. Die Hauptantriebsmechanismen für die Advektion in einem Endlager im Salzgestein sind die Konvergenz der Hohlräume und die Gasproduktion. Beide Prozesse führen zu einem Druckaufbau und verdrängen die Lösung aus dem Endlager. Weiterhin erfolgt der Radionuklidtransport noch diffusiv, dispersiv und konvektiv. Der konvektive Transport ist nur während der Phase der Wärmeentwicklung der Abfälle von Bedeutung oder wenn die Zusammensetzung der Lösung durch Um-

lösungsprozesse verändert wird. Beide Effekte verursachen Dichteunterschiede in der Lösung, die einen Lösungsstrom verursachen können.

Für die Modellierung des Radionuklidtransports im Endlager werden eine Vielzahl von Daten benötigt. Aufgrund der großen Mächtigkeit von Salzstöcken in steiler Lagerung werden Endlager unter Umständen mehrsöhlig angelegt, wodurch bei manchen Daten eine Teufenabhängigkeit berücksichtigt werden muss. Für ein Endlager mit mehr als einer Einlagerungssohle wird dazu ein Referenzniveau definiert, auf das alle standortspezifischen Daten bezogen werden können. Die lokalen Werte für die teufenabhängigen Daten werden in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand zum Referenzniveau berechnet.

Beim Zerfall des Radionuklidinventars wird Wärme freigesetzt, die sich von den Einlagerungsorten in das Wirtsgestein ausbreitet. Die Temperaturverteilung im Endlager hat einen Einfluss auf die Konvektion, Diffusion und die Hohlraumkonvergenz. Die durch die Abfälle verursachten Temperaturerhöhungen im Bereich des Endlagers werden für bestimmte Konfigurationen der Abfallbehälter mit speziellen Rechenprogrammen berechnet. Die Ergebnisse der Temperaturfeldberechnungen gehen in die Berechnungen zum Radionuklidtransport in der Langzeitsicherheitsanalyse ein, indem die Temperatur bei den genannten davon abhängigen Effekten explizit berücksichtigt wird. Zur Modellierung des thermisch induzierten konvektiven Lösungstransports werden die berechneten Temperaturgradienten verwendet.

Salzgestein ist unter äußerem Druck plastisch verformbar. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit sind folgende Auswirkungen der Konvergenz zu betrachten:

- Die Konvergenz führt zu einer Verkleinerung der Hohlräume und einer Verringerung der Permeabilität von kompaktierbarem Versatz. Durch die Verkleinerung der Hohlräume wird die Lösungsmenge begrenzt, die an die Abfälle gelangen kann. Die Porosität des Versatzes und seine Permeabilität können so weit abnehmen, dass der kompaktierte Versatz für die Lösung vollständig undurchlässig wird. Eine Freisetzung von Radionukliden wird in diesem Fall verhindert.
- Beim Auflaufen des Gebirges auf den Versatz übt dieser eine Stützwirkung aus, die zu einer Verringerung der Konvergenzrate führt.
- Ist Salzlösung an die Abfälle gelangt, ist die Konvergenz ein wesentlicher Antriebsmechanismus für den Schadstofftransport mit der kontaminierten Lösung.

Die Konvergenz kann somit je nach Szenario die Freisetzung des Nuklidinventars entweder verhindern oder unterstützen.

Im Modell wird für die Beschreibung der Konvergenz angenommen, dass die Verminderung des Volumens $dV(t)/dt$ zu jeder Zeit proportional zu dem vorhandenen Volumen $V(t)$ ist. Der Proportionalitätsfaktor K wird als Konvergenzrate bezeichnet und ist im Allgemeinen eine Funktion des Fluiddrucks p im Inneren des Hohlraums, der Porosität ϕ des Versatzes und der Gebirgstemperatur in der entsprechenden Teufe T . In der Modellierung wird für die funktionale Abhängigkeit der Konvergenzrate von den genannten Größen ein Produktansatz gewählt:

$$K(p, \phi, T) = K_r \cdot f_1(p) \cdot f_2(\phi) \cdot f_3(T) . \quad (3)$$

Der Faktor K_r wird als Referenzkonvergenzrate bezeichnet. Die Funktionen f_i geben die Abhängigkeit der Konvergenzrate von den Parametern p , ϕ und T wieder.

$$f_1(p) = \left(\frac{p_G(z) - p(z, t)}{p_G(z_r)} \right)^m \quad (4)$$

Die Konvergenzrate ist demnach abhängig von der Differenz zwischen dem Gebirgsdruck $p_G(z)$ und dem Fluiddruck $p(z, t)$ in der Teufe z . Die Größe $p_G(z_r)$ im Nenner bezeichnet den Gebirgsdruck in der Referenzteufe. Die Teufenabhängigkeit der Konvergenzrate über den Gebirgsdruck ist damit in der Funktion f_1 berücksichtigt. Hierdurch ist es möglich, die Referenzkonvergenzrate auf ein für das gesamte Endlager einheitliche Referenzniveau zu beziehen. Der Exponent m ergibt sich aus dem Stoffgesetz zur Beschreibung des sekundären Kriechens von Steinsalz und liegt ungefähr bei dem Wert 4.

Bei einem versetzten Hohlraum wird berücksichtigt, dass der Konvergenz aufgrund der sich allmählich verringernden Porosität des Versatzes ein wachsender Widerstand entgegenwirkt /STO 85b/ und der Versatz somit eine Stützwirkung ausübt:

$$f_2(\phi) = \phi \left(1 - \frac{\phi}{\phi_r} \right) \left[\left(1 - \frac{\phi}{\phi_r} \right)^2 + \left[\phi \left(1 - \frac{\phi}{\phi_r} \right) \right]^{1/m} \right]^{-m} \quad \text{für } \phi < \phi_r. \quad (5)$$

Diese Beziehung folgt aus dem Stoffgesetz für das sekundäre Kriechen von Steinsalz mit dem gleichen Wert für den Exponenten m wie in Gleichung (4). Die Größe ϕ_r ist die Referenzporosität, die jene Porosität kennzeichnet, bei der die Stützwirkung des Versatzes einsetzt. Für Porositäten $> \phi_r$ und nicht versetzte Hohlräume gilt daher $f_2 = 1$.

Die Funktion f_3 gibt die mit zunehmender Temperatur wachsende Kriechgeschwindigkeit des Steinsalzes wieder und hängt neben der Temperatur von der Aktivierungsenergie der Kriechprozesse ab /DIE 86/. Sie ist z. B. in /HIR 99/ wiedergegeben.

Für die Berechnung der Lösungsströme im Grubengebäude müssen die hydraulischen Widerstände der Transportstrecken bekannt sein. Für kompaktierbare Versatzmaterialien ist der Widerstand aufgrund der Konvergenz eine Funktion der Zeit. Für nicht kompaktierbare Versatzmaterialien oder Verschlüsse ist der Widerstand konstant. Für Salzgrus wurde eine empirische Beziehung zwischen der Porosität des Versatzes ϕ und der Permeabilität k in Form einer Potenzfunktion bestimmt:

$$k = c \cdot \phi^p \quad (6)$$

Hierbei sind c und p Konstanten, die aus experimentellen Ergebnissen bestimmt wurden /MÜL 99/.

Neben der Konvergenz stellt auch die Gasproduktion einen Antriebsmechanismus für die Advektion dar. Gase bilden sich im Endlager durch die anaerobe Korrosion metallischer oder die mikrobielle Zersetzung organischer Abfallbestandteile unter Verbrauch von Wasser. Die im Grubengebäude gebildeten Gase verdrängen Lösung in einer Menge, die dem Volumen der Gase unter dem Gebirgsdruck entspricht. Zur Berücksichtigung der Gasproduktion müssen die in der Abb. 14 aufgeführten Prozesse modelliert werden.

Bei der modelltechnischen Umsetzung der Gasproduktion werden für die vorkommenden Materialien unterschiedliche Korrosionsraten angenommen. Die Korrosionsrate kann je nach Material und Oberflächenbeschaffenheit entweder als konstant oder linear bzw. exponentiell mit der Zeit abnehmend gewählt werden. Bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen wird unter ungestörten Bedingungen die Gasproduktion durch die beschränkte Verfügbarkeit von Wasser im Versatz und im Gebirge begrenzt.

Daneben muss auch die Möglichkeit einer Ausbreitung von Radionukliden in der Gasphase betrachtet werden. Durch die Gasproduktion kann der Gasdruck in den Bohrlöchern, Strecken oder Kammern des Endlagers so weit ansteigen, dass der Gaseindringdruck der Verschlüsse überschritten und das Gas über die Abdichtungen freigesetzt wird. Kann das Gas aufgrund eines zu hohen Gaseindringdrucks der Abdichtungen oder der bereits durch die Konvergenz verschlossenen Strecken nicht entweichen, so kann der Gasdruck bis zur Höhe des Gebirgsdrucks ansteigen. Der Verbleib der Gase und die Auswirkungen von Gasdrücken im Bereich des petrostatischen Drucks auf das Wirtsgestein Salz ist Gegenstand aktueller Forschung.

4.2.2 Tongestein

In einer Tonformation können die Abfallbehälter entweder in Strecken oder Bohrlöcher eingelagert werden. Die Hohlräume um die Behälter werden mit Bentonit oder einem Bentonit-Sand-Gemisch aufgefüllt. Die Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld liegt zwischen den technischen Bentonitbarrieren und dem Wirtsgestein. Für den Fall der ungestörten Entwicklung des Endlagers im Tongestein wird davon ausgegangen, dass durch das Quellen bei der Wiederaufsättigung des Bentonits und die Verheilung der Auflockerungszonen im Wirtsgestein alle Wegsamkeiten in der Bentonitbarriere oder am Übergang zum Wirtsgestein verschwinden. In diesem Fall ist der Radionuklidtransport im Nahfeld ausschließlich diffusiv und kann analog zum Endlager in Granit in Kap. 4.2.3 betrachtet werden. Die zugrunde liegende Transportgleichung entspricht Gl. (7) für Granit. Ein Unterschied ergibt sich jedoch durch die äußere Randbedingung.

In einer Tonformation ist der Radionuklidtransport im Wirtsgestein ebenso wie in der Bentonitbarriere diffusiv. Dadurch wird der Transport vom Behälter bis zum Außenrand der Wirtsgesteinsformation durch die gleichen Mechanismen kontrolliert, jedoch mit unterschiedlichen Transportparametern. Der Transport im Nahfeld und der Transport im Wirtsgestein sind dadurch gekoppelt und müssen für eine exakte Modellierung gemeinsam betrachtet werden. Alternativ kann eine künstliche Randbedingung an der Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld zur Entkopplung der Transportprozesse eingeführt werden. Während die erste der beiden Möglichkeiten dem EMOS-Modul CLAYPOS zugrunde liegt, verwendete die Nagra in ihrem „Projekt Opalinuston“ eine Randbedingung für die Strömung an der Grenze zwischen Nahfeld und Fernfeld. Dabei wurde versucht, den Fluss aus dem Nahfeld konservativ abzuschätzen /GRI 02/.

Falls es bereits zu einer Freisetzung von Radionukliden kommt, bevor die Auflockerungszonen vollständig verheilt sind und Wegsamkeiten zwischen der Bentonitbarriere und dem Wirtsgestein bestehen, ist ein bevorzugter Transport entlang des Kluftnetzwerks möglich. Dabei kann zusätzlich die Gasproduktion als Antriebsmechanismus für einen advektiven Transport fungieren.

4.2.3 Granit

Bei Endlagern im Wirtsgestein Granit ist eine Einlagerung von Behältern mit hochradioaktiven Abfällen in Bohrlöchern geplant. Die Behälter werden vollständig mit Formsteinen aus kompaktiertem Bentonit ummantelt. Der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld befindet sich bei einem Endlager im Granit am Außenrand des Bentonitmantels. Im Programmpaket EMOS wird der Radionuklidtransport im Nahfeld eines Endlagers im Granit mit dem Modul GRAPOS beschrieben /LÜH 00/.

Der Radionuklidtransport durch den intakten, aufgesättigten Bentonitmantel erfolgt ausschließlich durch Diffusion. Antrieb für die Diffusion ist der radiale Konzentrationsgradient im Bentonitmantel. Die Konzentration am Innenrand des Bentonitmantels ergibt sich aus dem Grad der Mobilisierung der Radionuklide bzw. durch deren Löslichkeitsgrenze. Die Konzentration außerhalb des Bentonitmantels ergibt sich aus dem Radionuklidstrom aus dem Nahfeld und dem Fluss in den wasserführenden Zonen im Fernfeld, in dem der Radionuklidstrom verdünnt wird. Aufgrund der geometrischen Symmetrie des Behälters und des Bentonitmantels kann der diffusive Radionuklidtransport in erster Näherung eindimensional in radialer Richtung beschrieben werden. Dabei wird der Einfluss der beschränkten Länge der Behälter konservativ vernachlässigt. Die Transportgleichung für die Diffusion von Radionukliden aus einer Zerfallsreihe lautet:

$$R^i \frac{\partial C^i}{\partial t} = D^i \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C^i}{\partial r} \right) \right] - \lambda^i \left[R^i C^i - \sum_k R^k C^k \right] \quad (7)$$

wobei der Index k das Mutternuklid der i -ten Tochter bezeichnet. Weiterhin sind C die Konzentration, r der Radius, D der Diffusionskoeffizient und λ die Zerfallskonstante.

Eine Rückhaltung der Radionuklide erfolgt ggf. durch das Erreichen der Löslichkeitsgrenze im Behälter und durch die Sorption im Bentonit. Die Sorption wird über den

Rückhaltefaktor R in Gleichung (8) dargestellt. Für den Fall linearer Sorption nach dem K_d -Konzept ergibt sich der Rückhaltefaktor R zu:

$$R^i = 1 + \frac{1-n}{n} \rho K_d^i \quad (8)$$

mit der Porosität n , der Dichte ρ des Bentonits sowie dem Verteilungskoeffizienten für die Sorption der Nuklide an Bentonit K_d . Eine schematische Darstellung der Mechanismen im Nahfeld eines Endlagers im Granit zeigt Abb. 9 auf S. 33.

4.3 Radionuklidtransport im Fernfeld des Endlagers

Entsprechend dem jeweils betrachteten Szenario gelangen Schadstoffe aus dem Nahfeld in das Fernfeld und werden dort mit dem Grundwasser in die Biosphäre transportiert. Während man bei Endlagern im Kristallin (z. B. Granit) oder in Tongestein unter Fernfeld das Gebiet außerhalb der technischen Bentonitbarrieren, also Wirtsgestein und Deckgebirge versteht, betrachtet man bei Endlagern in Salzgestein nur das Deckgebirge und den nicht aufgelockerten Teil des Wirtsgesteins als Fernfeld (siehe Kap. 4.2.1 und 4.2.3). Im Szenario der ungestörten Entwicklung eines Endlagers in Salzgestein wird von einer Durchströmung des Fernfeldes ausgegangen, wobei aber aufgrund der Dichtheit des Salzgesteins das Grundwasser nicht kontaminiert wird und damit kein Radionuklidtransport stattfindet. Erst bei Störfallszenarien kommt es zur Freisetzung und zum Transport von Radionukliden durch das Fernfeld. Bei einem Endlager in Tongestein geht man von einem rein diffusiven Radionuklidtransport im Wirtsgestein selbst aus, nur innerhalb des Deckgebirges kann auch advektiver Transport stattfinden. Im Gegensatz dazu geht man bei einem Endlager in kristallinen Gesteinen davon aus, dass immer ein advektiver Radionuklidtransport über Klüfte stattfindet.

Beim Radionuklidtransport durch das Deckgebirge sind eine Reihe von chemisch-physikalischen Prozessen wirksam, wie beispielsweise Verdünnung oder elementspezifische Adsorptionsprozesse, welche die Schadstoffkonzentration beeinflussen. Diese Prozesse werden deshalb in Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager berücksichtigt. Wegen der Länge des Nachweiszeitraums ist man auf numerische Simulationen angewiesen. Diese Simulationen sollen die natürlichen Vorgänge realistisch darstellen, gleichzeitig aber so abstrakt wie möglich durchgeführt werden, um die Rechenzeiten für eine Sicherheitsanalyse in einem praktikablen Rahmen zu halten. Falls physikali-

sche Effekte vernachlässigt werden, muss gezeigt werden, dass dieses ein konservatives Vorgehen darstellt. Daneben müssen die Simulationen numerisch exakt sein.

In den folgenden Abschnitten werden die konzeptuellen Modelle skizziert, die bei der Modellierung des Schadstofftransports durch das Fernfeld angewendet werden.

4.3.1 Strömung

Bei ausschließlich diffusivem Transport ist die wichtigste Voraussetzung für eine Transportmodellierung eine hinreichend gute Beschreibung der Grundwasserströmung. Für ihre Modellierung werden die Fluidmasse (hier die Wassermasse) lokal (d. h. innerhalb eines Volumenelements) und für das gesamte Modellgebiet bilanziert, siehe Gleichung (9). Bei dichtegetriebenen Strömungen werden zusätzlich noch simultan die Masse des gelösten Salzes, siehe (10) und/oder die Wärmemenge bilanziert /FEI 99/. Im Falle einer nicht dichtegetriebenen Strömung (siehe auch Kapitel 0) entfällt Gleichung (10) und man spricht von einer Potenzialströmung.

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho_f) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{q}\rho_f) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho_f\chi_s) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{q}\rho_f\vec{\nabla}\chi_s - \mathbf{D}_s\rho_f\vec{\nabla}\chi_s) = 0 \quad (10)$$

mit

n durchflusswirksame Porosität [-]

ρ_f Dichte des Fluids [kg m^{-3}]

\vec{q} Filter- (Darcy-) Geschwindigkeit [m s^{-1}]

χ_s Massenbruch des gelösten Salzes [kg kg^{-1}]

\mathbf{D}_s Diffusions-Dispersionstensor für Salzlösung [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

Der Diffusions-Dispersionstensor, der nur beim Stoff- oder Wärmetransport in der Strömungsgleichung auftritt, wird mit Gleichung (16) für den Radionuklidtransport beschrieben.

Eine zu (10) analoge Gleichung, ergänzt um die Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix, beschreibt die Energieausbreitung, die entweder anstelle der Versalzung oder zusätzlich zu dieser berücksichtigt werden kann.

Sowohl für den porösen als auch für den geklüfteten Bereich gilt im Fall einer laminaren Strömung der lineare Darcy-Ansatz für Potenzialströmungen bzw. der erweiterte Darcy-Ansatz für Dichteströmungen:

$$\vec{q} = -\mathbf{K}\vec{\nabla}h = -\frac{k}{\mu}(\vec{\nabla}p + \rho\vec{g}) \quad (11)$$

mit

\mathbf{K}	Durchlässigkeitstensor [m s^{-1}]
$\vec{\nabla}h$	hydraulisches Gefälle [-]
k	Permeabilitätstensor [m^2]
μ	dynamische Viskosität [Pa s]
$\vec{\nabla}p$	Druckgefälle [Pa m^{-1}]
ρ	Dichte des Fluids [kg m^{-3}]
\vec{g}	örtliche Fallbeschleunigung = $9,81 \text{ [m s}^{-2}\text{]}$

Zur Simulation der Grundwasserströmung in porösen Medien werden die Gleichungen (9) - (11) für zwei oder drei Dimensionen simultan mit entsprechenden Rand- und Anfangsbedingungen numerisch gelöst. Für geklüftet-poröse Medien können die entsprechenden Gleichungen z. B. /KOL 97/ entnommen werden.

Prinzipiell können die Strömungsvorgänge mit freier Oberfläche modelliert werden. Dabei werden die Standrohrspiegelhöhen in Abhängigkeit von der jeweiligen hydrogeologischen Situation und von der Grundwasserneubildung berechnet. Da man

hauptsächlich an der Beschreibung der Strömung im tiefen Untergrund interessiert ist, geht man im Allgemeinen von gespannten Grundwasserverhältnissen aus. Dabei werden die Standrohrspiegelhöhen als Druck vorgegeben und die Grundwasserneubildung ergibt sich aus der Rechnung. Dieses führt häufig zu Diskrepanzen zwischen Messung und Simulation für die Grundwasserneubildung und/oder den gemessenen und angenommenen Permeabilitäten in den obersten Schichten des Modellgebietes. Dieses Vorgehen ist wegen der langen betrachteten Zeiträume und wegen des Interesses an der Strömung im tiefen Untergrund akzeptabel, zumal sich dadurch der Rechenaufwand beträchtlich reduziert. Die Simulationen des Strömungsfeldes werden im Allgemeinen, um die zeitliche Entwicklung des Strömungssystems nachvollziehen zu können (historical matching), transient bis zur Stationarität durchgeführt.

In Tab. 2 ist eine Auswahl der Rechenprogramme, die zur Berechnung von Grundwasserströmungen im Bereich der Endlagerung eingesetzt werden, aufgelistet. Zusätzlich sind Anwendungsbereich, numerisches Verfahren und Referenzen aufgelistet.

Tab. 2: Rechenprogramme zur Strömungsmodellierung (Auswahl)

Programm	Strömung	Medium	mathematisches Verfahren *	Referenz
Feflow	Potenzial-, Dichteströmung	porös, geklüftet	FE	/DIE 05/
d³f	(Potenzial-), Dichteströmung	porös	FV	/FEI 99/
Nammu	(Potenzial-), Dichteströmung	porös	FE	/HOC 03/
Rockflow	Potenzial-, Dichteströmung	porös, geklüftet	FE	/KOL 03/
Spring	Potenzial-, Dichteströmung	porös, geklüftet	FE	/SPR 06/
Sutra	Potenzial-, Dichteströmung	porös	FE	/VOS 03/
Tough2	Mehrphasenfluss	doppelporös	FD	/PRU 06/

* FD, FV, FE= finite Differenzen, Volumen bzw. Elemente

4.3.2 Transport

Im Anschluss an die oben beschriebene Strömungsberechnung können ein-, zwei- oder dreidimensionale Transportberechnungen durchgeführt werden. Voraussetzung für eine eindimensionale Modellierung ist aber, dass durch Particle-Tracking-Verfahren

einige wenige repräsentative Ausbreitungswege identifiziert werden können. Beim Particle-Tracking-Verfahren wird eine Teilchenwolke vom Eintrittsort in das Modellgebiet gestartet, und die Wege der einzelnen Teilchen durch das Modellgebiet werden verfolgt. Es wird also ein rein advektiver Transport ohne jegliche Wechselwirkung der Teilchen betrachtet. Im Falle der Identifizierung von repräsentativen Ausbreitungspfaden werden diese unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Gegebenheiten und der Strömungsverhältnisse auf ein eindimensionales Transportgebiet abgebildet. Bei eindimensionalen Transportberechnungen werden Geschwindigkeiten, Weglängen und hydrogeologische Parameter entsprechend der dreidimensionalen Modellierung verwendet. Nachteil dieses Verfahrens ist die Vernachlässigung des Transportes senkrecht zum Transportweg durch Diffusion und Dispersion. Es wird versucht, diesen Nachteil durch die Berücksichtigung von Verdünnungsfaktoren zu kompensieren.

Die wichtigsten Prozesse, die den Transport von Radionukliden durch das Fernfeld bestimmen, sind:

- Advektion,
- molekulare Diffusion,
- Dispersion,
- Akkumulation,
- radioaktiver Zerfall und
- chemische und physikalisch-chemische Reaktionen.

Advektion und molekulare Diffusion

„Advektiver Transport“ bezeichnet die Bewegung der Radionuklide mit der Abstandsgeschwindigkeit der Grundwasserströmung. Dabei sind sowohl die Richtung als auch der Betrag der Geschwindigkeit als Mittelwerte über ein so genanntes „Repräsentatives Elementarvolumen“ (REV) zu verstehen /MAR 86/.

$$\vec{j}_{adv} = \vec{u} \cdot n_f \cdot C \quad (12)$$

mit

$$\vec{u} \quad \vec{u} = \frac{\vec{q}}{n_f}; \text{ Abstandsgeschwindigkeit [m s}^{-1}\text{];}$$

n_f durchflusswirksame Porosität [-]

C Konzentration [mol m⁻³]

Die molekulare Diffusion wird durch die Brown'sche Molekularbewegung hervorgerufen.

$$\vec{j}_{diff} = -D_m \vec{\nabla} C \quad (13)$$

mit

D_m molekularer Diffusionskoeffizient [m² s⁻¹]

$\vec{\nabla} C$ Konzentrationsgefälle [mol m⁻⁴]

In porösen Medien steht für die Diffusion nur der poröse Anteil des Volumens zur Verfügung. Um dieses zu berücksichtigen, wird die Diffusionskonstante mit der Gesamtporosität multipliziert und dadurch reduziert.

$$\vec{j}_{diff} = -n_g D_m \vec{\nabla} C \quad (14)$$

wobei

n_g Gesamtporosität [-]

Zur Beschreibung des Transportes über makroskopische Distanzen müssen Mittelwerte der größten Abstandsgeschwindigkeit und Konzentration betrachtet werden. Für diese Mittelungsprozesse ist es vorteilhaft, alle betroffenen Größen in ihren Mittelwert und die lokale Abweichung zu zerlegen. Bei der Mittelung entsteht neben den Termen für den Advektions- und den Diffusionsstrom noch der Dispersionsterm. Er beschreibt den Massenfluss, der über den Advektionsterm hinaus aufgrund der Geschwindigkeits- und der Konzentrationsfluktuationen innerhalb des Mittelungsvolumens auftritt. Die

Größe des Mittelungsvolumens legt die Skalengröße fest, bis zu der Inhomogenitäten aufgelöst werden. Alle Transporteffekte, die durch kleinskalige Effekte bedingt werden, sind in der Dispersion zusammengefasst. Das bedeutet aber auch, dass im Allgemeinen Dispersionseffekte umso kleiner werden, je genauer die tatsächlichen Strömungs- und Konzentrationsfelder beschrieben werden /KIN 92/. Insofern ist die Dispersion im eigentlichen Sinne kein Transportprozess, sondern ein Artefakt der Mittelung über makroskopische Bereiche. In Analogie zur molekularen Diffusion wird der Dispersionsterm ansatzweise durch einen sogenannten Fick'schen Ansatz beschrieben.

$$\vec{j}_{disp} = -\mathbf{D}\vec{\nabla}C \quad (15)$$

mit

\mathbf{D} Dispersionstensor für Radionuklide [$m^2 s^{-1}$]

Der Dispersionseffekt kann durch einen Tensor zweiter Stufe dargestellt werden /SCH 61/, /BEA 61/. Nach Scheidegger gilt:

$$\mathbf{D} = \left[\alpha_T |\vec{q}| \mathbf{I} + \frac{\alpha_L - \alpha_T}{|\vec{q}|} \vec{q}\vec{q} \right] = n_g \left[\alpha_T |\vec{u}| \mathbf{I} + \frac{\alpha_L - \alpha_T}{|\vec{u}|} \vec{u}\vec{u} \right] \quad (16)$$

mit

α_L longitudinale Dispersionslänge [m]

α_T transversale Dispersionslänge [m]

\mathbf{I} symmetrischer Einheitstensor

$\vec{u}\vec{u}$ dyadisches Produkt der Abstandsgeschwindigkeit [$m^2 s^{-2}$]
bzw.

$\vec{q}\vec{q}$ dyadisches Produkt der Filtergeschwindigkeit [$m^2 s^{-2}$]

Die Dispersion ist immer anisotrop, auch wenn die Permeabilität des durchströmten Mediums isotrop ist.

Die Akkumulation ist die zu einem Zeitpunkt im Kontrollvolumen vorhandene Masse:

$$m_{acc} = n_g C \quad (17)$$

Die eventuell vorhandenen Quellen oder Senken im Kontrollvolumen werden mit Q bezeichnet und haben entgegengesetzte Vorzeichen.

Für jedes Kontrollvolumen gilt die Massenerhaltung, d. h. die zeitliche Änderung der akkumulierten Masse im Innern des Kontrollvolumens und der gesamte Massenfluss über die Oberfläche des Kontrollvolumens müssen gleich den darin vorhandenen Quellen oder Senken sein. Dieser Sachverhalt kann unter der Voraussetzung konstanter Fluidichte mathematisch folgendermaßen dargestellt werden:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_g C) + \vec{\nabla} \cdot (n_f u - D \vec{\nabla} C) = Q \quad (18)$$

Im Weiteren unterscheidet man nicht mehr zwischen der durchflusswirksamen Porosität n_f und der Gesamtporosität n_g . Im Falle dichtegetriebener Strömungen, bei denen die Dichte des Fluids durch gelöstes Salz oder durch gelöste Schadstoffe verändert wird, können die entsprechenden Gleichungen /FEI 04/ entnommen werden.

Für radioaktive Zerfallsreihen werden der Zerfall des Mutternuklids als Senke und die Bildung des Tochternuklids als Quelle modelliert.

$$\frac{\partial}{\partial t}(nC_i) + \vec{\nabla} \cdot (nC_i u - D \vec{\nabla} C_i) = -\lambda_i nC_i + \sum_{k(i)} \lambda_k nC_k \quad (19)$$

Hierin bedeuten:

i Index der Tochter (Massenzahl des Radionuklids)

$k(i)$ Indizes der Mütter des Radionuklids mit dem Index i

λ_i Zerfallskonstante des Radionuklids i [s^{-1}]

Halbwertszeit: $T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$ [s]

Im Allgemeinen wird der Schadstoffeintrag ins Deckgebirge als Punktquelle modelliert, da die Ausdehnung der Eintragsfläche gegenüber der Ausdehnung des Deckgebirges vernachlässigt werden kann. Dies stellt aber keine prinzipielle Einschränkung dar.

Adsorption

Die chemischen und physikalisch-chemischen Wechselwirkungen zwischen den Radionukliden und dem Fluid mit den darin gelösten Stoffen sowie mit der Gesteinsmatrix sind die wichtigsten Ursachen für die Adsorption und Ausfällung der Radionuklide und ihre Umkehrreaktionen Desorption und Auflösung. Diese Wechselwirkungen können eine Änderung des chemischen Milieus bewirken, wodurch aber auch wiederum die Adsorption und die Ausfällung beeinflusst werden. Für die Adsorption ist insbesondere die Oberflächenkomplexbildung, d. h. die Wechselwirkung zwischen bestimmten gelösten Wasserinhaltsstoffen und der Gesteinsoberfläche, verantwortlich. Für die Ausfällung sind im besonderen Maße die Redox- und pH-Zustände maßgeblich. Mit Experimenten und Speziationsrechnungen werden empirische Sorptionsparameter und Löslichkeitsgrenzen für die Modellierung der Sorption bestimmt.

Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass im Deckgebirge über Salzstöcken die Konzentrationen der Radionuklide wegen der Verdünnung der kontaminierten Salzlösung mit Grundwasser ihre Löslichkeitsgrenzen niemals erreichen. Für Endlager in Tonformationen wird angenommen, dass der Ton als Puffer wirkt und dadurch die Redox- und pH-Zustände zeitlich konstant sind. Da der diffusive Radionuklidtransport in diesem Fall dominant ist, werden Löslichkeitsgrenzen nur im Nahfeld in den Abfallgebirgen und im Bentonitbuffer betrachtet, aber nicht im Fernfeld der Wirtsgesteinsformation.

Betrachtet man zusätzlich noch die Konzentrationen der adsorbierten und ausgefällten Radionuklide, ergibt sich anstelle von (19) die Massenbilanz:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(C_i^l + C_i^p + \frac{1-n}{n} \rho_{rock} C_i^{ad} \right) + \vec{\nabla} \cdot (u C_i - \mathbf{D} \vec{\nabla} C_i) = -\lambda_i C_i + \sum_{k(i)} \lambda_k C_k \quad (20)$$

Hierbei bedeuten:

l Index für gelöste Radionuklide (liquid)

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

ad Index für adsorbierte Radionuklide (adsorbed)

P Index für ausgefällte Radionuklide (precipitated)

ρ_{rock} Gesteinsdichte [kg m^{-3}]

Die Sorption wird empirisch durch Adsorptionsisothermen beschrieben, deren Wichtigste die von Henry, Langmuir und Freundlich sind:

$$C_i^{ad} = K_d^{e(i)} C_i^l \quad \text{Henry} \quad (21)$$

$$C_i^{ad} = \frac{b\kappa}{1 + bC_{e(i)}^l} C_i^l \quad \text{Langmuir} \quad (22)$$

$$C_i^{ad} = K_{nl} \left(C_{e(i)}^l \right)^{p-1} C_i^l \quad \text{Freundlich} \quad (23)$$

Hierbei bedeuten:

i Index des Tochternuklids (Massenzahl)

$e(i)$ Element zu dem das Radionuklid mit dem Index i gehört

$K_d^{e(i)}$ elementspezifischer K_d -Wert [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

$b = b^{e(i)}$ elementspezifische Sorptionskonstante der Langmuir-Isotherme [$\text{m}^3 \text{mol}^{-1}$]

$\kappa = \kappa^{e(i)}$ elementspezifische Sorptionskapazität der Langmuir-Isotherme [mol kg^{-1}]

$K_{nl} = K_{nl}^{e(i)}$ elementspezifische Sorptionskonstante der Freundlich-Isotherme [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

$p = p^{e(i)}$ elementspezifischer Exponent der Freundlich-Isotherme [-]

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Isotope eines Elementes chemisch nicht unterscheiden. Da bei der Adsorption elementspezifische chemische Prozesse ablaufen, sind hierbei nicht die Mengen der einzelnen Radionuklide, sondern die Gesamtmenge der radioaktiven und stabilen Isotope maßgebend. Falls die Reaktionsgeschwindigkeiten für Bindung (Adsorption) und Freisetzung (Desorption) übereinstimmen, läuft der Prozess im chemischen Gleichgewicht ab. In diesem Fall kann die Adsorption durch sogenannte Adsorptionsisothermen beschrieben werden. Die Einfachste, die Henry-Isotherme, ist ein linearer Zusammenhang zwischen den Konzentrationen der adsorbierten und der im Grundwasser gelösten Radionuklide. Dabei wird angenommen, dass die Dauer der Gleichgewichtseinstellung im Vergleich zur Zeitskala der Strömung vernachlässigbar ist und daher von einer instantanen Gleichgewichtseinstellung ausgegangen werden kann. Andere, realistischere Isothermen gehen von einem nicht-linearen Zusammenhang zwischen den Konzentrationen der adsorbierten und der im Grundwasser gelösten Radionuklide aus (Freundlich-, Langmuir-Isotherme).

In Abb. 16 sind die Konzentrationen der sorbierten Radionuklide gegen die Konzentrationen der gelösten Radionuklide nach den genannten Adsorptionsisothermen aufgetragen. Während die Henry-Isotherme einen linearen Verlauf nimmt (lineare Sorption), zeigen die Langmuir- und die Freundlich-Isotherme einen nichtlinearen Verlauf (nichtlineare Sorption). Weiterhin kann man erkennen, dass bei den beiden letztgenannten Isothermen die Mengen der sorbierten Radionuklide durch eine Sättigungsgrenze beschränkt sind.

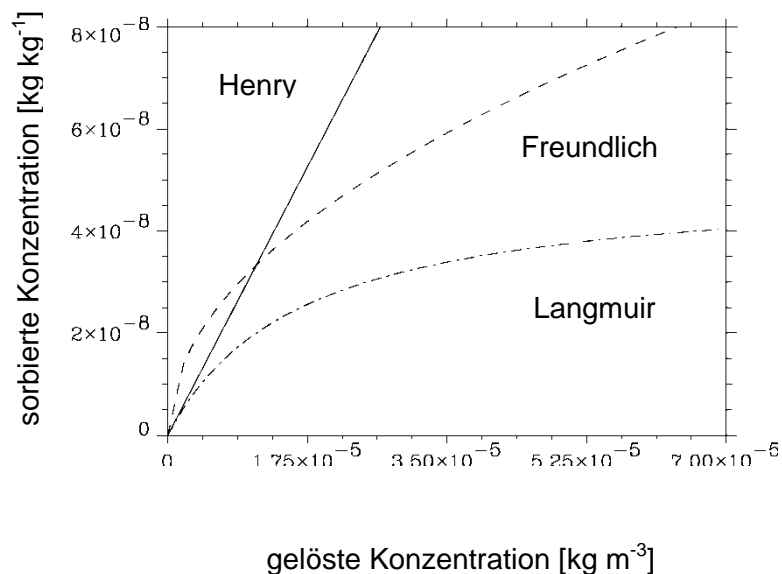


Abb. 16 Vergleich zwischen Henry-, Freundlich- und Langmuir-Isothermen

Falls man bei der Adsorption nicht von Gleichgewichtszuständen ausgehen kann, sich also Sorptions- und Desorptionsgeschwindigkeiten signifikant unterscheiden, spricht man von kinetikgesteuerter Sorption. Während sich bei der Gleichgewichtssorption die Konzentration der sorbierten Radionuklide als lineare oder nichtlineare Funktion der Konzentration der gelösten Radionuklide darstellen lässt, wird im Falle der kinetikgesteuerten Sorption die Konzentration der sorbierten Radionuklide durch eine gewöhnliche Differenzialgleichung beschrieben. Unter Vernachlässigung des radioaktiven Zerfalls ergeben sich:

$$\frac{\partial}{\partial t} C_i^{ad} = k_{\alpha}^{e(i)} \left(K_d^{e(i)} C_i^l - C_i^{ad} \right) \quad \text{Henry} \quad (24)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_i^{ad} = k_{\alpha}^{e(i)} \left(\frac{b\kappa}{1+bC_{e(i)}^l} C_i^l - C_i^{ad} \right) \quad \text{Langmuir} \quad (25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_i^{ad} = k_{\alpha}^{e(i)} \left(K_{nl} \left(C_{e(i)}^l \right)^{p-1} C_i^l - C_i^{ad} \right) \quad \text{Freundlich} \quad (26)$$

mit

$k_{\alpha}^{e(i)}$ elementspezifische Reaktionskonstante für die kinetisch gesteuerte Sorption [s^{-1}]

Die Ausfällung oder Lösung wird durch elementspezifische Löslichkeitsgrenzen beschrieben:

$$\left. \begin{array}{l} C_{e(i)}^l \leq L_{e(i)} \\ C_{e(i)}^l > L_{e(i)} \end{array} \right\} \Rightarrow C_i^p = \begin{cases} 0 \\ \frac{C_i^l}{C_{e(i)}^l} (C_{e(i)}^l - L_{e(i)}) \end{cases}$$

und

$$\left. \begin{array}{l} C_{e(i)}^l \leq L_{e(i)} \\ C_{e(i)}^l > L_{e(i)} \end{array} \right\} \Rightarrow C_i^l = \begin{cases} C_i^l \\ \frac{C_i^l}{C_{e(i)}^l} L_{e(i)} \end{cases}$$

mit

$L_{e(i)}$ elementspezifische Löslichkeitsgrenze [s^{-1}]

In Tab. 3 ist eine Auswahl von Computercodes zur Transportmodellierung mit einigen wichtigen Eigenschaften zusammengestellt. Nicht alle Rechenprogramme enthalten sämtliche der oben aufgeführten Optionen zur Transportmodellierung.

Tab. 3: Ausgewählte Rechenprogramme zur Transportmodellierung

Programm	Transport	Medium	math. Verfahren *	Referenz
eindimensional				
CHETLIN	lineare Sorption	porös	FD	/KÜH 96/
CHETNIS	nichtlineare Sorption	porös	FD	/LÜH 96/
CHETMAD	Matrixdiffusion	geklüftet	FD	/LÜH 00/
zweidimensional				
TRAPIC	kolloidalen Transport, homogene Strömung	porös	FV	/LÜH 99a/
dreidimensional				
Feflow	lineare, nichtlineare Sorption, Radionuklidketten	porös, geklüftet	FE	/DIE 05/
r³t	lineare, nichtlineare Sorption, Löslichkeitsgrenzen Radionuklidketten	porös	FV	/FEI 04/
Nammu		porös, geklüftet	FE	/HOC 03/
Rockflow	lineare, nichtlineare Sorption, Radionuklidketten	porös, geklüftet	FE	/KOL 03/
Spring	lineare, nichtlineare Sorption, Radionuklidketten	porös, geklüftet	FE	/SPR 06/
Sutra	Einzelnuclid	porös	FE	/VOS 03/
Tough2		doppelporös	FD	/PRU 06/
Mufte-ug	Mehrphasen-Mehrkomponenten	porös, geklüftet	FV	/ASS 05/

* FD, FV, FE= finite Differenzen, Volumen bzw. Elemente

Speziation

Speziation ist die Verteilung eines oder mehrerer chemischer Elemente auf alle seine möglichen Verbindungen (Spezies) in einem gegebenen System (siehe /BRE 04/). Die Speziation ist z. B. entscheidend dafür, ob ein Schadstoff als gelöste Komponente leicht transportiert und aufgenommen werden kann oder ob er als feste mineralische Phase ausfällt oder an Oberflächen adsorbiert wird.

Die Verteilung der Spezies wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Temperatur und Druck
- Konzentrationen der Elemente
- Ionenstärke bzw. Aktivitätskoeffizienten
- pH-Wert
- Redoxpotenziale
- vorhandene feste Phasen
- Art, Größe und Struktur vorhandener Oberflächen
- Kolloide
- Mikroorganismen

Die oben genannten Einflussfaktoren sind über thermodynamische Gesetzmäßigkeiten miteinander verknüpft, die sich wechselseitig beeinflussen. Es liegt ein sehr komplexes System vor.

Die Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichts in natürlichen Systemen ist nicht immer gerechtfertigt. So sind die ausfallenden festen Phasen oft thermodynamisch instabil und wandeln sich allmählich in kristalline Phasen um. Viele Minerale verwittern auch unter dem Einfluss von Luft oder Wasser. Es kommt zur sogenannten Sekundärphasenbildung. Solche vergleichsweise langsamen Reaktionen erfordern die Einbeziehung kinetischer Gesetzmäßigkeiten.

Die mathematische Behandlung der Speziation führt zu einem nichtlinearen Gleichungssystem, welches nur iterativ gelöst werden kann. Die Numerik beruht meist auf einem zweistufigen Verfahren. Zuerst werden Startwerte geschätzt und eine robuste Näherung durchgeführt. Im zweiten Schritt kommt ein hybrides Newton-Raphson-Verfahren mit Relaxation zur Anwendung. In jedem Iterationsschritt werden die Aktivitätskoeffizienten jeweils konstant gehalten und nach Bestimmung aller Konzentrationen neu berechnet. Ergebnisse solcher Speziationsmodellierungen sind dann typischerweise die Speziesverteilung aller Elemente, die Aktivität und Aktivitätskoeffizienten aller Spezies, Redoxpotenziale und die Sättigungsindizes der Minerale.

Mit den in der Tab. 4 aufgeführten Programmen steht für einfache natürliche Systeme, die durch eine begrenzte Anzahl von Komponenten, bekannte Randbedingungen und thermodynamisches Gleichgewicht gekennzeichnet sind, leistungsfähige Software zur Auswertung und Interpretation geochemischer Reaktionen zur Verfügung. Bei der Beschreibung komplexer natürlicher Systeme mit solchen geochemischen Modellen bestehen derzeit jedoch noch Einschränkungen, da beim Einsatz dieser Programme eine Reihe von häufig nicht eingehaltenen bzw. nur schwer überprüfbar Annahmen gemacht werden (siehe /VOI 98/). Bisher gibt es wegen des sehr hohen Rechenaufwands nur wenige gekoppelte Transportprogramme. Hierbei werden alternierend für jeden Iterationsschritt Speziation und Transport unter Konstanzhaltung der jeweils anderen Parameter berechnet.

Tab. 4 Softwarepakete zur Modellierung chemischer Speziationen (Auswahl)

Programm	Oberflächenkomplexierung *	Kinetik	Hohe Ionenstärke (Pitzer)	Referenz
EQ3/6	-	+	+	/WOL 92/
PHREEQC	++	+	+	/PAR 99/
CHEMAPP	-	-	+	/ERI 90/, /ERI 94/, /ERI 95/
GWB	+	+	+	/BET 05/
WATEQ	-	-	-	/BAL 87/
MINTEQ	+++	-	-	/ALL 91/
HYDRAQL	+++	-	-	/PAP 88/

* Die Zahl der „+“-Zeichen charakterisiert die Anzahl der implementierten Modelle zur Oberflächenkomplexierung

Kolloidaler Transport

Der Transport von Radionukliden kann durch kolloidale Wasserinhaltsstoffe (anorganische Kolloide, Huminstoffe) sowie durch Eigenkolloide beeinflusst werden. Diese Kolloide können als Träger fungieren, wenn sich daran Schadstoffe anlagern. Die Migration von Radionukliden kann durch die Anwesenheit von Kolloiden sowohl beschleunigt als auch verzögert werden. Eine Retention tritt bei Rückhaltung der kolloidgebundenen Schadstoffe an der Gesteinsmatrix auf. Eine Verstärkung findet statt, wenn die Löslichkeit der Schadstoffe durch Kolloidbildung erhöht oder die Sorption an der Gesteinsmatrix behindert wird und die Kolloide ausreichend mobil sind. In Abb. 17 sind die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen Gesteinsmatrix, Kolloiden und Radionukliden schematisch dargestellt.

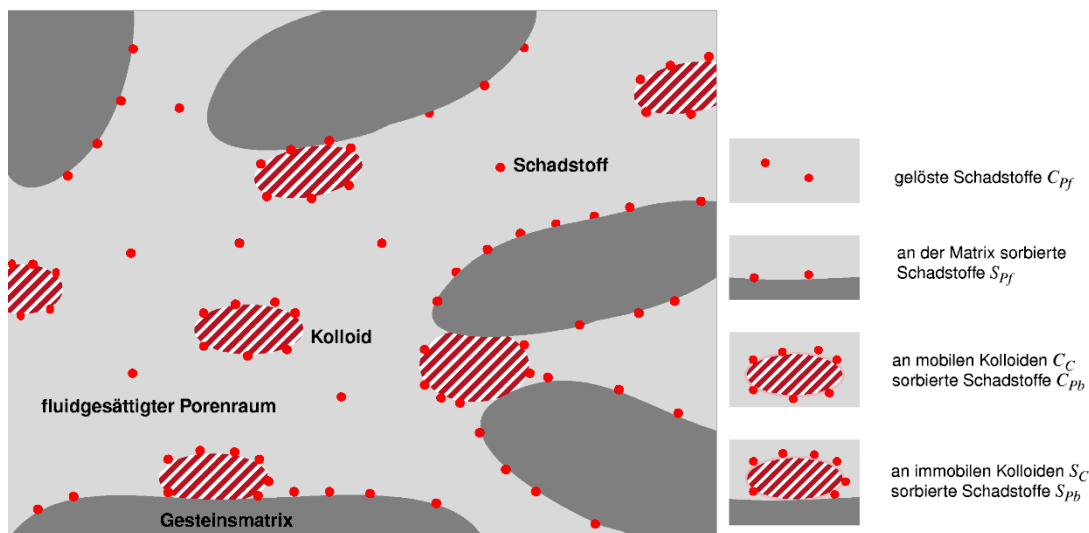


Abb. 17 Schematische Darstellung von kolloid- und schadstoffbelastetem Porenwasser /LÜH 99b/

Prinzipiell kann der Transport von Radionukliden durch das Deckgebirge in der Anwesenheit von Kolloiden über zwei Mechanismen erfolgen: zum einen durch den Transport der gelösten Radionuklide und zum anderen durch den Transport der mobilen Kolloide, an die Radionuklide durch Sorption gebunden sind. Die Rückhaltung der Nuklide erfolgt durch Sorption an der Gesteinsmatrix und durch die Sorption an immobilen Kolloiden, die ihrerseits durch Sorption oder Filtration zurückgehalten werden. Die Nuklide können in folgenden Phasen vorliegen:

- gelöst im Grundwasser,
- sorbiert an der Gesteinsmatrix,

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- sorbiert an mobilen Kolloiden,
- sorbiert an immobilen Kolloiden.

Zwischen diesen Phasen können, wie in Abb. 18 dargestellt, folgende Übergänge stattfinden:

- Q1: Sorption und Desorption der Nuklide an der Gesteinsmatrix
- Q2: Sorption und Desorption mit Nukliden befrachteter Kolloide an der Gesteinsmatrix
- Q3: Sorption und Desorption der Nuklide an Kolloiden
- Q4: Sorption und Desorption der Nuklide an immobilen Kolloiden.

Alle aufgeführten Übergänge können entweder instantan durch Gleichgewichtssorption oder zeitabhängig durch kinetikgesteuerte Sorption ablaufen.

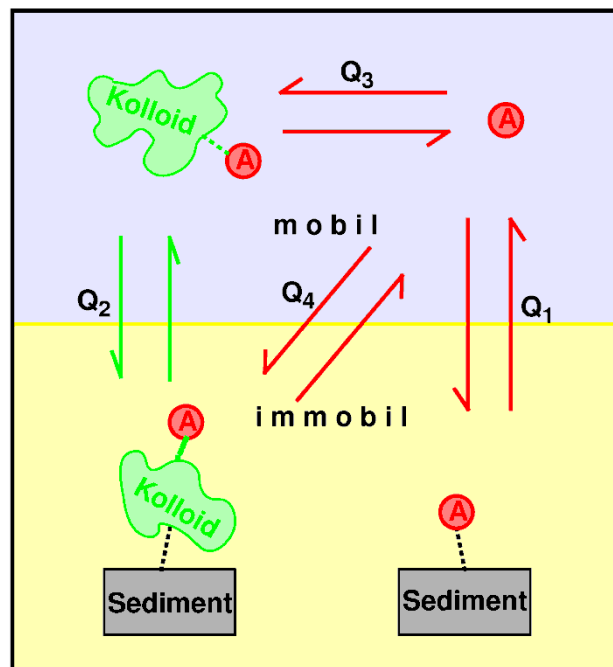


Abb. 18 Phasen beim kolloidgetragenen Schadstofftransport (A: Schadstoff) /LÜH 99b/

Der Transport der Kolloide wird wesentlich durch zwei Effekte beeinflusst. Erstens können sich die Kolloide mit größerer Geschwindigkeit als der örtlichen Abstandsgeschwindigkeit¹⁰ $u = q/n$ bewegen. Letztere stellt eine über die Poren gemittelte Geschwindigkeit dar, während die Bahngeschwindigkeiten parabelförmige Profile mit Maxima im Zentrum der Porenkanäle und mit nach außen abnehmenden Geschwindigkeiten aufweisen. Aufgrund der Kolloidgröße bewegen sich die Kolloide in mittleren Bereichen der Porenkanäle. Dieser Effekt kann durch elektrostatische Wechselwirkungen zwischen Kolloiden und Gesteinsmatrix zusätzlich verstärkt werden. Der zweite Effekt wird als Filtration bezeichnet. Hierunter versteht man, dass Kolloide aufgrund ihrer Größe nicht durch Porenkanäle transportiert werden können und Porenkanäle verstopfen können. Dazu zählt unter anderem auch die Sedimentation von Kolloiden, falls diese eine größere Dichte als das Grundwasser aufweisen. Weitere Ausführungen zu dieser Thematik finden sich in /LÜH 99a/ und /LÜH 99b/.

Für eine vereinfachte Modellierung des kolloidbeeinflussten Schadstofftransportes wird von einem Gleichgewichtszustand zwischen gelösten, kolloidgebundenen und an der Gesteinsmatrix sorbierten Schadstoffen ausgegangen. Damit ergibt sich eine Reduktion der Sorption bei Anwesenheit von Kolloiden. Für die Modellierung bedeutet dieses, dass der Kolloideinfluss entsprechend dem Einfluss von Komplexbildnern berücksichtigt werden kann. Das bedeutet, dass der Einfluss der Kolloide durch die Berücksichtigung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Sorptionskoeffizienten und der Kolloidkonzentration modelliert werden kann.

Transport im Zweiphasenfluss

Ein weiterer Transportmechanismus ist der Zweiphasen-Mehrkomponenten-Transport, d. h. die Bewegung von Schadstoffen mit einer Zweiphasenströmung. Dabei bewegen sich zwei nicht mischbare Fluide (z. B. Luft und Wasser) gleichzeitig durch ein Rohr- oder Porennetzwerk. Beim Salzgestein hat diese Transportart aufgrund der räumlichen Entfernung des Deckgebirges vom Entstehungsort der durch Korrosion der Abfallbehälter und Radiolyse gebildeten Gase keine Bedeutung. Im Granit werden die Gase aufgrund des niedrigen Eindringdruckes leicht in Klüfte migrieren und dort abgeführt

¹⁰ Die Abstandsgeschwindigkeit u ist die mittlere Geschwindigkeit eines Wasserteilchens oder eines gelösten Stoffes in den Poren eines porösen Mediums. Im Gegensatz dazu ist die Bahngeschwindigkeit die tatsächliche, ständig wechselnde Geschwindigkeit, mit der sich ein Wasserteilchen durch die Poren eines porösen Mediums bewegt, während die Filtergeschwindigkeit diejenige Geschwindigkeit ist, die das Wasserteilchen hätte, wenn nicht nur der Porenraum, sondern die gesamte Querschnittsfläche des porösen Mediums für die Strömung zur Verfügung stünde

werden /KUL 02/, /MAR 99/. In Tongestein kann sich eine volle Zweiphasenströmung ausbilden. Für Einzelheiten bezüglich der Modellierung von Mehrphasenströmungen siehe z. B. /HEL 97/.

4.4 Radiologische Auswirkungen in der Biosphäre

Zur Ermittlung von radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre ist in Langzeitsicherheitsanalysen zum einen der Transfer der Radionuklide innerhalb der Biosphäre zu modellieren. Zum anderen ist eine Person oder eine Personengruppe mit ihren Lebensgewohnheiten zu definieren, für welche die Auswirkungen ermittelt werden sollen.

Es können unterschiedliche Zielsetzungen für die Modellierung vorgegeben werden. Dabei kann der Fokus darauf gelegt werden, die Auswirkungen

- möglichst realistisch,
- im Sinne von Mittelwerten,
- mit einem bestimmten Perzentil (z. B. 95%-Perzentil) abdeckend oder
- grundsätzlich abdeckend

zu ermitteln. Für Langzeitsicherheitsanalysen ist es in der Regel erforderlich, grundsätzlich abdeckende Modelle und Parameterwerte zu verwenden oder umfangreiche Unsicherheitsanalysen und Sensitivitätsanalysen bezüglich der Parameterwerte durchzuführen, beispielsweise um Auswirkungen von Klimawechseln zu erfassen.

Für die Person oder die Personengruppe, für die die Auswirkungen ermittelt werden sollen, gibt es international Konzepte mit einer „Referenzperson“ (z. B. in der deutschen Strahlenschutzverordnung vom 20. Juni 2001), mit einer „kritischen Gruppe“ /ICR 85/ oder mit einem „repräsentativen Individuum“ /ICR 06/. Die üblichen, nicht speziell auf Endlager zugeschnittenen Konzepte des Schutzes der kritischen Gruppe oder des repräsentativen Individuums haben grundsätzlich den Nachteil, dass sie aktuelle Lebensgewohnheiten der Bevölkerung standortspezifisch berücksichtigen, was für Betrachtungen für die Zukunft an Grenzen stößt.

Als abgeleitete Größe wird vereinfachend oft der „Dosiskonversionsfaktor“¹¹ verwendet, mit dem sich aus der Konzentration der Einzelradionuklide im Grundwasser unmittelbar die resultierende Strahlenexposition einer Referenzperson berechnen lässt. In die Herleitung des Dosiskonversionsfaktors fließt das gesamte radioökologische Modell der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 StrlSchV (AVV) /BMU 90/¹² ein, das für die Ermittlung der Ausbreitung in der Biosphäre, des Übergangs in einzelne Umweltmedien bis hin zur Aufnahme von Radionukliden durch den Menschen bzw. dessen äußerer Strahlenexposition verwendet wird.

4.4.1 Bisheriges Vorgehen in Deutschland

In Deutschland wird bei der Ermittlung der Strahlenexposition von Personen der Bevölkerung im Allgemeinen auf eine „Referenzperson“ Bezug genommen. Diese ist in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) mit bestimmten Eigenschaften und Lebensgewohnheiten definiert und bei der Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitungen mit Luft und Wasser aus kerntechnischen Anlagen verbindlich gemacht. Weiter konkretisiert wird das Modell zur Ermittlung der Strahlenexposition in der AVV zu § 45 StrlSchV /BMU 90/. Das in der AVV festgelegte radioökologische Modell ist durch folgende grundsätzliche Sachverhalte charakterisiert:

- Zugrunde zu legen sind reale Nutzungsmöglichkeiten in der Umgebung, also nicht die aktuell tatsächlich vorliegenden Arten der Nutzung wie Wohnbebauung, Landwirtschaft etc.
- Die Ermittlung der Ausbreitung in der Umgebung erfolgt möglichst realitätsnah durch Verwendung standortspezifischer statistischer Datensätze aus langfristigen meteorologischen Messungen.
- Viele Parameterwerte sind nicht als abdeckend anzusehen, sondern eher als Durchschnitt von zum Teil erheblich streuenden Werte (z. B. Transferfaktoren Bodenpflanze, Dosiskoeffizienten).

¹¹ normierte Strahlenexposition, berechnet nach Modell und Parametern der AVV /BMU 90/ für eine normierte Kontamination des Grundwassers mit einem Radionuklid. Der Dosiskonversionsfaktor hat die Einheit (Sv/a)/(Bq/l)

¹² Die Anpassung an die 2001 novellierte Strahlenschutzverordnung steht derzeit (2008) noch aus

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- Den Verzehrsmengen von Lebensmitteln liegen statistische Daten zugrunde, mit denen das 95-%-Perzentil abgedeckt werden soll.
- Einige Annahmen sind in hohem Maße abdeckend (z. B. ganzjähriger Aufenthalt der Referenzperson im Freien, Bezug aller Lebensmittel der Referenzperson von der ungünstigsten Einwirkungsstelle).
- Insgesamt soll das Ergebnis abdeckend sein, was insbesondere durch die letztgenannten Annahmen erreicht wird.

Die AVV legt für den Wasserpfad die folgenden Expositionspfade fest:

- Aufenthalt auf kontaminiertem Flusssediment,
- Verzehr von Trinkwasser,
- Transfer Wasser - Fisch und anschließender Fischverzehr,
- Transfer über Viehtränke - Kuh - Milch und anschließender Verzehr von Milch und Milchprodukten,
- Transfer über Viehtränke - Tier - Fleisch und anschließender Verzehr von Fleisch und Fleischprodukten,
- Transfer über Beregnung - Futterpflanze - Kuh - Milch und anschließender Verzehr von Milch und Milchprodukten,
- Transfer über Beregnung - Futterpflanze - Tier - Fleisch und anschließender Verzehr von Fleisch und Fleischprodukten,
- Transfer Beregnung - Pflanze und anschließender Verzehr pflanzlicher Lebensmittel,
- Aufnahme radioaktiver Stoffe durch die Mutter, Transfer in die Muttermilch und anschließender Verzehr der Muttermilch durch den Säugling,
- Landwirtschaftliche Nutzung auf Überschwemmungsgebieten,
- Landwirtschaftliche Nutzung von Fluss- und Klärschlamm.

Zur Ermittlung von Strahlenexpositionen müssen aber nicht alle Expositionspfade berücksichtigt werden. So bleiben nach /BMU 90/, /BMU 05/ Expositionspfade unberücksichtigt oder zusätzliche Expositionspfade sind zu berücksichtigen, wenn dies aufgrund

der örtlichen Besonderheiten des Standortes oder aufgrund der Art der Anlage oder Einrichtung begründet ist.

Für die Modellierung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern wurde in Deutschland bisher auf die AVV zurückgegriffen. Dabei waren einzelne Anpassungen erforderlich, die grundsätzliche Vorgehensweise wurde aber übernommen.

4.4.2 Internationale Entwicklung

Seit 1991 befasst sich die "Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal" (bis 1995 "INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal") der IAEA, die dort dem "International Radioactive Waste Management Advisory Committee (INWAC)" zugeordnet ist, mit bestimmten Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. In ihrem vierten Bericht /IAE 99/ befasste sich die Arbeitsgruppe mit der "kritischen Gruppe" und der Modellierung der Biosphäre in Zusammenhang mit der Dosisermittlung beim Langzeitsicherheitsnachweis eines Endlagers.

Die Arbeitsgruppe kommt in /IAE 99/ zu folgenden Empfehlungen:

- Für den Zeitraum einer Überwachung kann die kritische Gruppe identifiziert werden.
- Im Zeitraum von 100 bis 10.000 Jahren nach Verschluss können Dosen und Risiken entweder
 - ausgehend von einer kritischen Gruppe, ermittelt anhand regionaler Lebensgewohnheiten, in einer geeigneten Biosphäre oder
 - ausgehend von einer hypothetischen kritischen Gruppe in einer Referenzbiosphäre ermittelt werden
- Im Zeitraum 10.000 Jahre bis 1 Million Jahre sollte eine hypothetische kritische Gruppe in einer Referenzbiosphäre angenommen werden (eine Gemeinschaft, die die Nahrung für ihren Eigenbedarf produziert und unter gleichen klimatischen Verhältnissen wie den bestehenden lebt).
- Weitere Arbeiten, einen Konsens über die Festlegung der Eigenschaften einer hypothetischen kritischen Gruppe in einer Referenzbiosphäre herbeizuführen, sollten

im Rahmen des Forschungsprogramms „Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS)“ erfolgen.

Das von der IAEA initiierte Programm BIOMASS lief im Oktober 1996 an. Im Rahmen dieses Programms sollten Vorhersageinstrumente für den Transfer von Radionukliden in der Umwelt entwickelt und verbessert werden. Das Programm befasste sich mit drei Themen, von denen eines „Endlager für radioaktive Abfälle“ lautete. Unter diesem Thema sollte ein Konzept für eine Standard-Referenzbiosphäre für die Modellierungen in Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt werden. Im Bericht /IAE 03a/ sind die Ergebnisse der Programms für die Teile A (Überblick), B (Methodik der Modellierung und der Entwicklung von Referenzbiosphären) und C (Beispiele für Referenzbiosphären) dokumentiert.

Der erste Schritt in der Bestimmung einer repräsentativen Biosphäre für die Dosisabschätzung ist nach /IAEA 03a/ die Definition des Kontextes für diese Abschätzung. Dieser Schritt umfasst die

- Festlegung der Aufgabe der Abschätzung und der zu berücksichtigenden Bewertungsgrößen (z. B. Individualdosis, Kollektivdosis, Risiko),
- Erfassung des Zusammenhangs von Endlager und Standort,
- Ermittlung des Quellterms, die Befassung mit der Schnittstelle von Geosphäre und Biosphäre,
- Festlegung des Zeithorizonts der Berechnungen sowie
- Definition der zugrunde zu legenden Philosophie (insbesondere Grad der angestrebten Konservativität).

Diesem Schritt schließt sich die Identifizierung und Begründung von Biosphärensystemen an. In diesem Schritt werden charakteristische Bestandteile der Biosphärensysteme erfasst (z. B. Klimatyp, geografische Ausdehnung, Topografie, Nutzungsarten). Außerdem ist zu entscheiden, ob zukünftige Änderungen der Biosphäre zu berücksichtigen sind (an einem Küstenstandort beispielsweise eine Änderung des Meeresspiegels) und falls ja, wie dies erfolgen soll. Es können verschiedene, sich nicht verändernde Biosphären modelliert werden, um die Bandbreite möglicher Entwicklungen zu erfassen. Ebenso kann eine Abfolge von verschiedenen Biosphären modelliert werden,

um die Änderungen zu ermitteln, die sich bei den Übergängen zwischen diesen Systemen ergeben.

Der dritte Schritt ist die Darstellung des zu modellierenden Biosphärensystems (bzw. mehrerer solcher Systeme). Es muss festgelegt werden, in welchem Umfang anthropogene Einflüsse auf die Biosphäre berücksichtigt werden sollen. Dann müssen für jeden identifizierten Bestandteil des Systems die potenziell wichtigen charakteristischen Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEP, siehe Abschn. 3.2) daraufhin überprüft werden, welche dieser FEP weiter berücksichtigt werden müssen.

Darauf aufbauend werden im vierten Schritt die zu berücksichtigenden potenziell exponierten Gruppen identifiziert, beispielsweise anhand der sozio-ökonomischen Gegebenheiten am Standort.

Im fünften Schritt erfolgt schließlich die Modellentwicklung. Zunächst werden die relevanten Medien aufgelistet (z. B. Wasser, Boden, landwirtschaftliche Produkte, Tiere), in die Radionuklide übertreten oder in denen Radionuklide angereichert werden können. Dann werden die Ausbreitungspfade durch diese Medien (und korrespondierende FEP) identifiziert. In /IAE 03a/ werden Hilfsmittel angeführt, mit denen die Vollständigkeit gewährleistet werden kann, wie z. B. Checklisten, Überprüfung anhand unabhängiger FEP-Listen oder die Aufstellung einer Radionuklid-Transfer-Matrix. Die Kombination von Daten und mathematischen Modellen erlaubt zunächst die Berechnung von Radionuklidkonzentrationen in verschiedenen relevanten Medien, dann auch die Berechnung von Strahlenexpositionen oder anderen Bewertungsgrößen auf Grundlage der Radionuklidkonzentrationen. Das Verfahren läuft hier iterativ ab, indem relevante Bestandteile identifiziert werden und deren Modellierung erforderlichenfalls verfeinert wird.

Die in /IAE 03a/ entwickelten Beispiele für Referenzbiosphären dienen einerseits der Demonstration des Vorgehens, sollen aber andererseits auch geeignet sein, in vielen Kontexten praktisch verwendet werden zu können. Drei Referenzbiosphären wurden entwickelt, die sich auf ein gemäßigtes Klima und sich nicht verändernde Bedingungen in der Biosphäre beziehen:

- Entnahme von Trinkwasser aus dem kontaminierten Grundwasserleiter über einen Brunnen,

- Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen mit Wasser aus dem kontaminierten Grundwasserleiter über einen Brunnen,
- natürlich bedingter Austrag aus einem kontaminierten Grundwasserleiter in verschiedene Lebensräume, u. a. kulturfähiges Land, Weideland, halbnatürliche Feuchtgebiete, Binnensee.

Darüber hinaus wurden in /IAE 03a/ zur Demonstration drei Referenzbiosphären entwickelt, die sich ändernde Biosphären beinhalten. Dabei wurden zwei reale Standorte, über die detaillierte Informationen verfügbar waren (Harwell/Südengland und Äspö/Schweden) und ein generischer Standort untersucht.

4.5 Anwendung der sicherheitsanalytischen Methoden und Modelle

Im Folgenden werden beispielhaft einige bisher durchgeführte Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager und ihre Ergebnisse kurz dargestellt.

4.5.1 Generische Langzeitsicherheitsanalysen ohne Standortbezug

In Deutschland wurden bisher vorwiegend generische Sicherheitsanalysen für Endlager für hochradioaktive Abfälle durchgeführt. Sicherheitsnachweise wurden im Rahmen von Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Beseitigung schwachradioaktiver Abfälle erstellt (Schachanlage Konrad mit Planfeststellung, Nachweise für die Schließung von Asse und ERAM in Entwicklung).

Die erste generische Sicherheitsanalyse für ein Endlager im Salz wurde im Rahmen des Projektes Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE) durchgeführt und 1983 abgeschlossen /PSE 83/. Im gleichen Jahr schloss die schwedische SKB ein ähnliches Projekt für ein Endlager in Granit ab (KBS 3-Studie, /SKB 83/). Auch die schweizerische Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle legte mit dem Projekt Gewähr 1985 /NAG 85/ eine erste Anwendung der sicherheitsanalytischen Methode vor.

Diese Sicherheitsanalysen waren generisch, d. h., ihnen lagen keine konkreten Standortdaten zugrunde. Die angenommenen geologischen Verhältnisse waren auf dem Stand der damaligen Kenntnisse als idealtypisch und repräsentativ anzusehen. Ty-

pisch war, dass diese Analysen Strahlenexpositionen ergaben, die im Maximum um viele Größenordnungen unter den radiologischen Schutzziele (z. B. /SKB 83/).

Einen Überblick über die bis 1997 durchgeführten Langzeitsicherheitsanalysen gibt /NEA 1997/. Hier werden auch Empfehlungen für die Strukturierung der entsprechenden Berichte gegeben. Im Folgenden werden Aufbau und Ergebnisse der ersten Analyse der deutschen Verhältnisse sowie neuere derartige ausländische Analysen kurz vorgestellt.

EU: PAGIS

Unter der Trägerschaft der Europäischen Kommission wurde zwischen 1982 und 1988 PAGIS („Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste“) erarbeitet /PAG 1988a/. PAGIS umfasste Referenzstandorte für die Wirtsgesteine Granit, Salz, Tiefseesedimente und Ton.

PAGIS basiert zwar weitgehend auf generischen Daten, identifiziert und beschreibt aber soweit wie möglich konkrete Standorte und legt diese in einer Auswahl den generischen Daten zugrunde. Generell war der damals erreichte Erkundungsgrad der vier Wirtsgesteine gering und auch in der Auswahl sehr uneinheitlich, sodass von einer weitgehend generischen Modellierung mit einigen Standortbezügen gesprochen werden kann.

Die PAGIS-Studie für das Wirtsgestein Salz bezieht sich in seinen beiden Referenzszenarien einerseits auf den Salzstock Gorleben, andererseits auf eine Salzformation in flacher Lagerung im Rhône/Saône-Tal. Die Rechnungen mit den Best-Estimate-Parameterwerten im Szenario „Subrosion“ ergaben Strahlenexpositionen in der Größenordnung von 10^{-6} Sv/a, mit Hauptbeiträgen der Nuklide Np-237 und U-234 zur Gesamtdosis, wobei das Maximum der Strahlenexposition nach 15 Mio. Jahren auftritt. Als „Störfallszenario“ wird die Ereignisabfolge eines Lösungszutritts über den Hauptanhydrit des Salzstocks, die Auflösung radioaktiver Stoffe und die anschließende Freisetzung aus dem Salzstock über den Hauptanhydrit („Anhydritszenario“) betrachtet. Abb. 19 zeigt die für dieses Szenario berechneten Beiträge der dominierenden Radionuklide zur Gesamtdosis in Abhängigkeit von der Zeit.

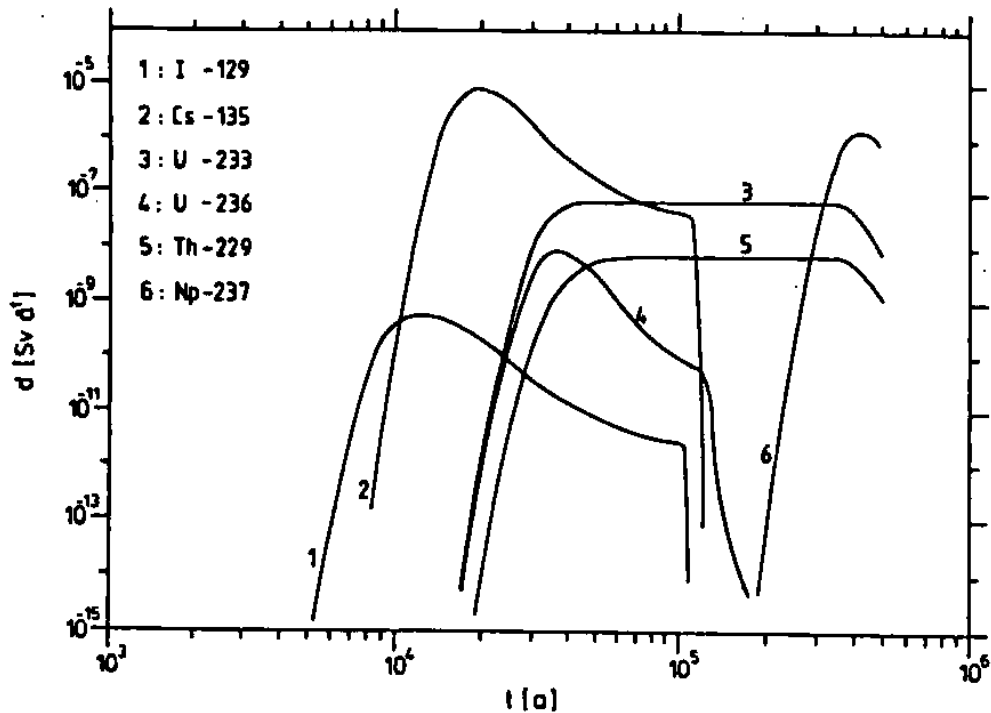


Abb. 19 Dosisverlauf im Szenario „Lösungszutritt und Austritt über den Hauptanhydrit“ für den Standort Gorleben /PAG 88b/

4.5.2 Standortbezogene Langzeitsicherheitsanalysen

Nachfolgend werden einzelne ausgewählte Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene internationale Endlagerprojekte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen dargestellt.

Belgien: SAFIR-2

Nachdem im Rahmen von PAGIS ein erstes Performance Assessment für das Wirtsgestein Boom Clay erarbeitet worden war, legte die belgische ONDRAF/NIRAS im Jahr 2001 die umfangreiche, methodisch relativ weit fortgeschrittene Langzeitsicherheitsanalyse SAFIR 2 für ein Endlager im Wirtsgestein Boom-Clay vor /OND 01/. Im Referenzszenario wird darin von einem frühen Versagen der Behälter ausgegangen, einer Ausbreitung per Diffusion durch den Boom-Clay und einem Brunnenszenario in dem darüber bzw. darunter liegenden Grundwasserleiter. Die wichtigste Barriere ist hier die Verzögerung der diffusiven Ausbreitung durch den Boom-Clay.

In Abb. 20 ist der zeitliche Verlauf der Strahlenexposition in der Biosphäre für ein Brunnenszenario dargestellt, ausgehend von der Endlagerung von 1.980 t abgebrannter Brennelemente.

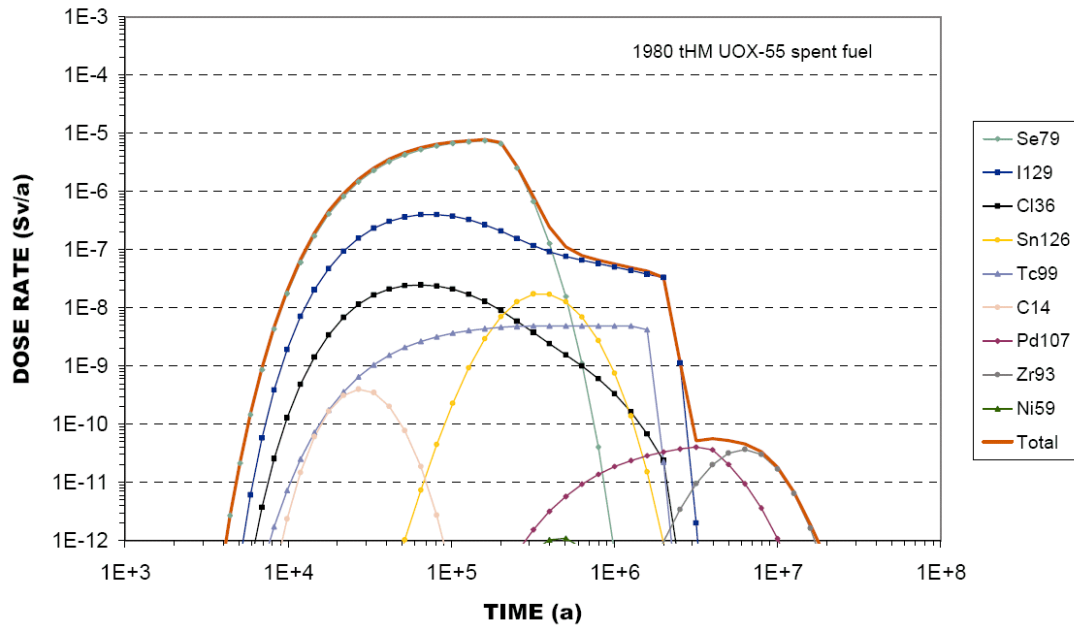


Abb. 20 Strahlenexposition bei der Endlagerung von 1.980 t abgebrannter BE und Ausbreitung über den Boom-Clay /OND 01/

SAFIR-2 liegen standortspezifische Verhältnisse zugrunde, die bei der übertägigen Erkundung im Raum Mol und im dortigen Untertagelabor HADES ermittelt wurden. Die Standortbezogenheit ist zwar wesentlich ausgeprägter als in der früheren PAGIS-Studie. Die Untersuchung hat aber aufgrund fehlender Detailerkundungen (auch untertägiger Erkundungen) noch einen ausgeprägten generischen Charakter.

Schweiz: NAGRA Entsorgungsnachweis Opalinuston

Seit den 1990er Jahren erarbeitete die schweizerische Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) den Entsorgungsnachweis für die Endlagerung im Opalinuston in der Nordschweiz und schloss diesen 2002 ab. Bestandteil des Entsorgungsnachweises ist neben dem Nachweis der bautechnischen Machbarkeit und den geologischen Untersuchungen auch eine Analyse der Langzeitsicherheit /NAG 02a-d/.

Im Referenzszenario der Langzeitsicherheitsanalyse wird von einem Versagen der Behälter, der Diffusion von Radionukliden durch den Opalinuston und einem Eintritt der

Radionuklide in wasserführende Schichten ausgegangen/NAG 02a/. Das Schema der Radionuklidausbreitung in den verschiedenen Gesteinsschichten ist in Abb. 21 skizziert.

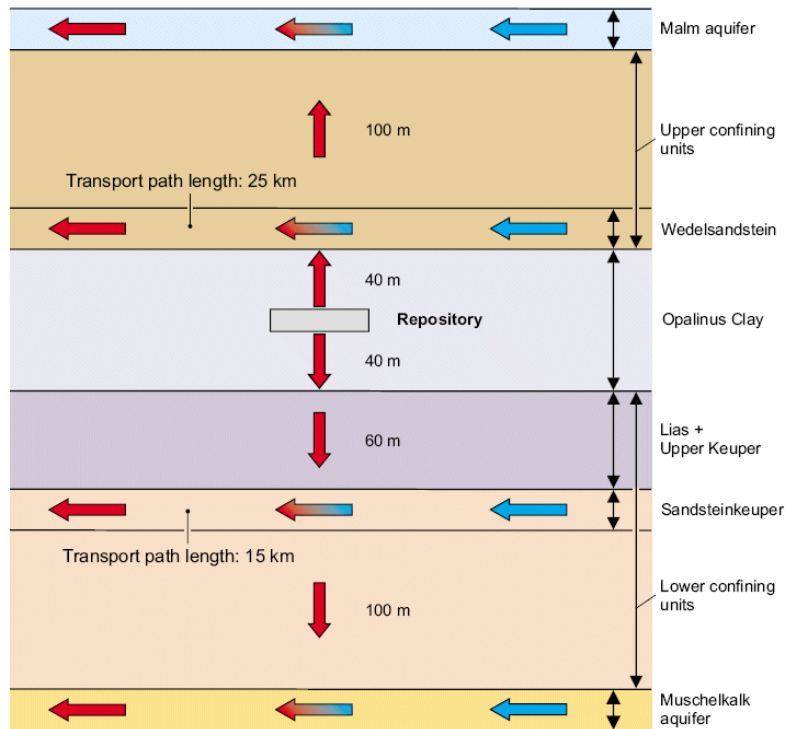


Abb. 21 Räumliche und geologische Verhältnisse bei der Untersuchung der Langzeitsicherheit im Opalinuston /NAG 02c/

Die Untersuchung liefert das Ergebnis, dass der vorgegebene Dosisgrenzwert von 0,1 mSv/a eingehalten wird. Die Abb. 22 zeigt die potenzielle Strahlenexposition aus der Endlagerung abgebrannter Brennelemente. Entscheidenden Einfluss auf die Strahlenexposition hat die sehr langsame Ausbreitung der Radionuklide über die stark verzögerte Diffusion im Opalinuston. Die dosisbestimmenden Radionuklide sind C-14 für den Gaspfad und I-129 für den Wasserpfad.

Die Datengrundlage für den Nachweis lieferten die detaillierten überörtlichen Erkundungen in der Nordschweiz und im Zürcher Weinland am Standort Benken (u. a. 2D- und 3D-Seismik, Erkundungsbohrungen, Bohrung Benken) und die Untersuchungen des Opalinustons im Untertagelabor Mt. Terri. Die Datenbasis für diese Untersuchung ist somit durch einen sehr hohen Grad an Standortdetails charakterisiert und geht daher weit über generische Studien ohne Standortbezug hinaus.

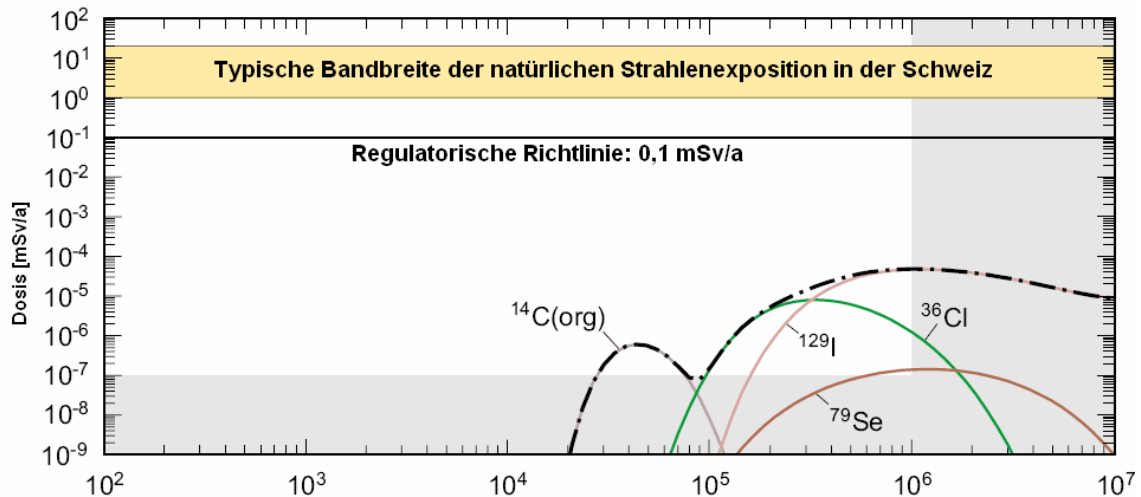


Abb. 22 Potenzielle Strahlenexposition im Referenzszenario aus der Endlagerung abgebrannter Brennelemente im Opalinuston /NAG 02c/

USA: Yucca Mountain

Das amerikanische Energieministerium (Department of Energy, US-DOE) hat im Rahmen der Standortentscheidung für ein Endlager Yucca Mountain, Nevada, eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung „Environmental Impact Statement“ (EIS) durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden auch die radiologischen Auswirkungen des Endlagers ermittelt und im EIS dargestellt /DOE 02/.

In der Langzeitsicherheitsanalyse werden das Szenario „normale Entwicklung“ und die Störfallszenarien „Magmaintrusion“ und „Menschlicher Eingriff“ untersucht. Beim Szenario „normale Entwicklung“ wird unterstellt, dass durch Behälterkorrosion in zunehmendem Maß Radionuklide in das Nahfeld freigesetzt werden, diese mit Sickerwässern bis in wasserführende Horizonte gelangen und in 18 km Entfernung als Grundwasser genutzt werden. Die im Rahmen einer probabilistischen Analyse berechneten Dosisverläufe für dieses Szenario zeigt Abb. 23. Die Grafik zeigt außerdem den Mittel- bzw. den Median, die Ober- und Untergrenzen des 90%-Vertrauensintervalls für die Strahlenexposition aller Einzelsimulationen sowie die regulatorischen Grenzwerte (0,15 mSv/a in den ersten 10.000 Jahren der Nachbetriebsphase und danach 3,5 mSv/a).

Die Oszillationen rühren von Klimawechseln her, die die Auslaugung und den Austrag in das Grundwasser schwächen bzw. verstärken. Die dosisbestimmenden Radionuklide sind TC-99, C-14 und I-129.

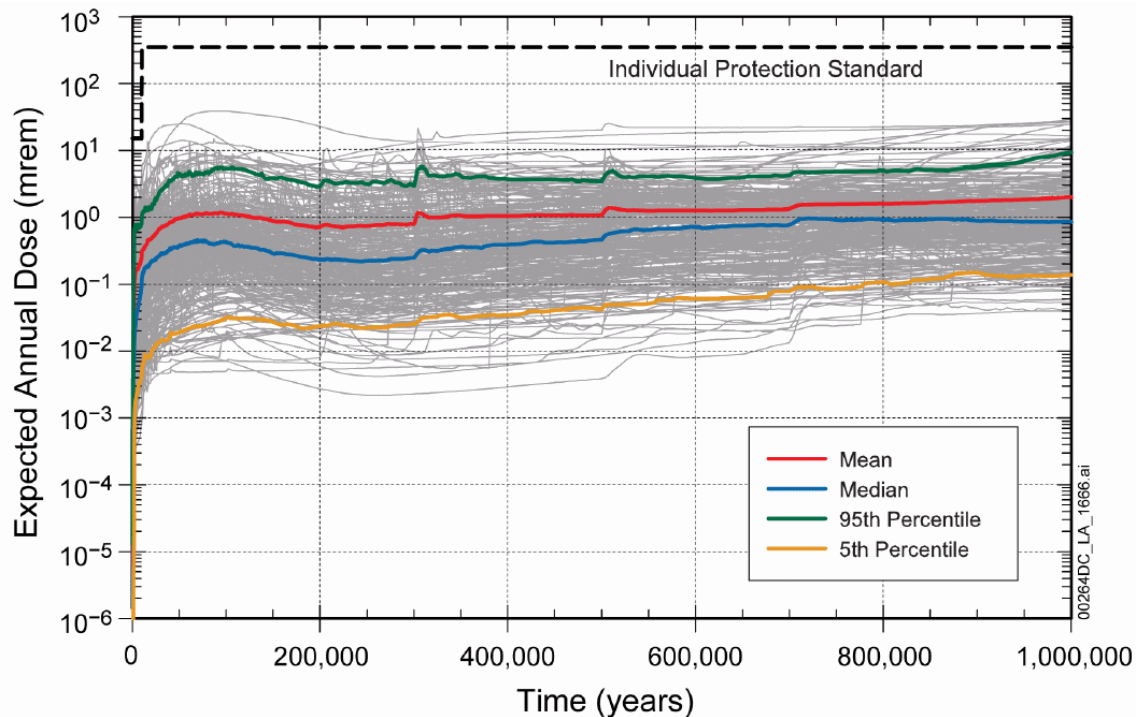


Abb. 23 Strahlenexposition im Referenzszenario aus der Endlagerung abgebrannter Brennelemente im Wirtsgestein Tuff am Standort Yucca Mountain, Referenz und Parametervariation, aus /DOE 08/

Die Untersuchungen basieren auf den umfangreichen Arbeiten zur Standortcharakterisierung für das Endlager, die seit Mitte der Achtziger Jahre durchgeführt werden. Die Analyse ist daher für den Standort Yucca Mountain spezifisch: Sie ist bislang die einzige Analyse dieser Art, die in ein Genehmigungsverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle eingeht.

Frankreich: Ton- und Granit-Studie

Die in Frankreich mit der Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle beauftragte Institution Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactives (ANDRA) hat 2005 zwei Studien abgeschlossen, die sich mit der Machbarkeit der Endlagerung in Frankreich in Tonformationen (Dossier 2005 Argile) /AND 05a/ und in Granit (Dossier 05 Granite) /AND 05b/ befassen.

Bei der Untersuchung der Langzeitsicherheit des Endlagers im Ton /AND 05c/ wird im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse ein Referenzszenario mit einem Versagen der Behälter, Ausbreitung der Radionuklide in der Tonformation und deren Übergang in die Biosphäre modelliert. Ferner werden in zahlreichen Variationen die Sensitivitäten der

einzelnen Eingangsparameter untersucht. Als Beispiel ist das Ergebnis für das Referenzszenario für eine relevante Abfallart (hier abgebrannte Brennelemente) in Abb. 24 dargestellt. Die Abbildung zeigt die gesamte potenzielle Strahlenexposition im Zeitraum von einer Million Jahren und die Anteile der wichtigsten Radionuklide Jod-129, Chlor-36 und Selen-79 im Vergleich zum regulatorischen Grenzwert („limite RFS“).

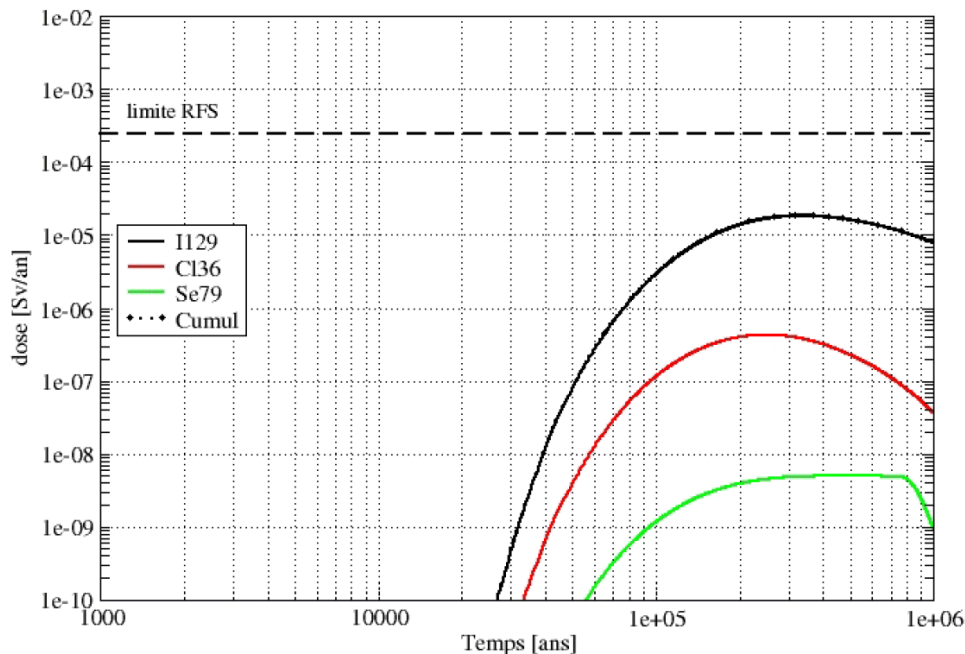


Abb. 24 Strahlenexposition aus CU1-Abfällen im Referenzszenario (abgebrannte MOX- und REPU-Brennelemente) in einem Endlager in Tongestein, aus /AND 05c/

In der Studie für das Wirtsgestein Ton sind die Standortverhältnisse beim Untertagelabor Bure im Departement Meuse/Haute Marne zugrunde gelegt. Der Standort ist im Rahmen der Tätigkeit des Untertagelabors detailliert charakterisiert, es handelt sich daher um eine sehr standortspezifische Betrachtung.

Die Untersuchung zum Granit /AND 05b/ ist weniger eng auf einen bestimmten Standort bezogen. Stattdessen werden insgesamt drei Typen von Granitvorkommen („M1“, „M2“ und „M3“) zugrunde gelegt, die in Frankreich vorkommen. Der Schwerpunkt liegt in der Untersuchung des Durchflusses im zerklüfteten Granit und auf der Sorption von Radionukliden in diesem Wirtsgestein. Die Anzahl untersuchter Varianten ist in der Granitstudie wesentlich geringer als in der Studie für das Wirtsgestein Ton. Die Untersuchung gibt lediglich Durchflüsse für Radionuklide an und unternimmt aufgrund der fehlenden hydrogeologischen Daten keine Dosisberechnungen.

4.6 Schlussbemerkungen

International gibt es derzeit noch kein einheitliches Konzept für die Vorgehensweise zur Prognose der langfristigen radiologischen Auswirkungen eines Endlagers in Langzeitsicherheitsanalysen. Da eine Ermittlung realistischer potenzieller radiologischer Auswirkungen nicht möglich ist, können nur Abschätzungen mit bestimmten Zielvorgaben der Konservativität, d. h. vertrauenswürdige Obergrenzen der Strahlenexposition, sowie Unsicherheitsanalysen und Sensitivitätsanalysen vorgenommen werden.

Für ein Genehmigungsverfahren in Deutschland wäre es sinnvoll, das Modell zur Ermittlung der Dosis aus den Aktivitätskonzentrationen in der Biosphäre sowie die vorzunehmenden Unsicherheitsanalysen regulatorisch vorzugeben. Dazu können die Grundzüge sowie die Zielsetzungen der AVV übernommen werden. Außerdem wäre es sinnvoll, die Vorgaben zu den Expositionspfaden und den Parametern auf die für den Eintrag radioaktiver Stoffe in die Biosphäre aus einem Endlager relevanten Teile zu beschränken.

In Deutschland wurde in den vergangenen Jahrzehnten ein umfangreiches Instrumentarium zur Durchführung von Langzeitsicherheitsanalysen entwickelt - zunächst vorrangig für Endlager im Salzgestein, später auch für andere Wirtsgesteine. Dieses Instrumentarium wurde kontinuierlich weiterentwickelt durch Einbeziehung

- der Fortschritte bei der Modellierung von Einzelprozessen aufgrund neuer Forschungsergebnisse,
- der Möglichkeiten zur Verbesserung und Verfeinerung der numerischen Rechnungen durch Ausschöpfung der Leistungszuwächse im EDV-Bereich,
- der internationalen Entwicklungen und Empfehlungen,
- der Anforderungen in Genehmigungsverfahren für Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmentwicklung.

Für die zukünftigen Genehmigungsverfahren bzw. die Entwicklung des Safety Cases für ein deutsches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle ist es erforderlich, dass mindestens zwei unabhängige Institutionen existieren, die entweder für die Antragsteller- oder die Genehmigungsseite tätig werden können und über das dafür notwendige Instrumentarium verfügen, das zudem an den fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden muss.

5 Literatur

(Hinweis: dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur)

- /ALL 91/ Allison, J.D., Brown, D.S.; Novo-Gradac, K.J.: MINTEQA2/PRODEFA2, A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: Version 3.0, User's Manual. - EPA/600/3-91/021. United States Environmental Protection Agency, 1991.
- /AND 05a/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse Dossier 2005 Argile. - Paris, 2005.
- /AND 05b/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Intérêt des formations granitiques pour le stockage géologique - Dossier 2005 Granite. - Paris, 2005.
- /AND 05c/ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile. Tome Safety evaluation of a geological repository. - Paris, 2005.
- /ASS 05/ Assterrawatt, A. u. a.: MUFTE-UG: Structure, Applications and Numerical Methods. - Newsletter, Volume XXIII ISSUE 2, International Groundwater Modeling Centre, Colorado School of Mines, 2005.
- /BAL 87/ Ball, J.W.; Nordstrom, D.K.; Zachmann, D.W.: WATEQ4F - A Personal Computer FORTRAN Translation of the Geochemical Model WATEQ2 with Revised Data Base. - United States Geological Survey Water Resources Investigations, 87-50, 1987.
- /BEA 61/ Bear, J.: On the Tensor Form of Dispersion. - J. Geophys. Res. 66, 4, S. 185ff, 1961
- /BET 05/ Bethke, C.M.: The Geochemist's Workbench. - Release 6.0, Rock Ware, Golden, Colorado, USA 2005.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /BFS 04/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Grundsätze für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle - Die Sicherheitsphilosophie des BfS; 2. Entwurf Dezember 2004.
- /BFS 05a/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe. - Broschüre, 61 Seiten, Salzgitter, 2005.
http://www.bfs.de/bfs/druck/broschueren/Endlagerung_national.pdf (04. Dez. 2006).
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz. - Salzgitter, 2005.
- /BGR 08/ ISIBEL „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“, FEP-Generierung und Szenarienentwicklung, - BGR, Hannover, 2008.
- /BMU 90/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen vom 21. Februar 1990. - Bundesanzeiger Jahrgang 42, Nr. 64a, 31.3.1990
- /BON 95/ Bonano, E.J.; Baca, R.G.: Review of Scenario Selection Approaches for Performance Assessments of High-Level Waste Repositories and Related Issues. - NUREG/CR-6333 (CNWRA 94-020), 1995.
- /BRE 04/ Brendler, V.: Chemische Speziation gelöster Stoffe. <http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pOid=12717&pNid=0&pContLang=de>
- /DBE 08/ ISIBEL „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“: FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Version 01. - Gemeinsamer Bericht von DBETec, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, 2008.

- /DIE 86/ Diekmann, N.; Hunsche, U.; Meister, D.: Über das geomechanische Verhalten von Steinsalz bei erhöhten Temperaturen. - Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 137. S. 29-46, 1986.
- /DIE 05/ DHI-WASY: WASY-Software FEFLOW. -
<http://www.wasy.de/deutsch/produkte/feflow> (01.08.2008)
- /DOE 02/ US Department of Energy (US-DOE): Final Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada. - DOE/EIS-0250, Washington, 2002.
http://www.eh.doe.gov/NEPA/eis/eis0250/vol_1/Vol1_chpt_5-4.pdf
- /DOE 08/ US Department of Energy (US-DOE): Final Supplemental Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada. U.S. Department of Energy Office of Civilian Radioactive Waste Management. - DOE/EIS-0250F-S1, Washington, Juni 2008
http://www.ocrwm.doe.gov/ym_repository/seis/docs/002_Summary.pdf
- /ERI 90/ Eriksson, G.; Hack, K.: ChemSage - A Computer Program for the Calculation of Complex Chemical Equilibria. - Metallurgical Transactions B, 21B: 1013, 1990.
- /ERI 94/ Eriksson, G.; Sippola, H.; Sundman, B.: A Proposal for a General Thermodynamic Software Interface. In: Jokilaakso, A. (editor) Proceedings of the Colloquium on "Process Simulation" in Espoo, Finland. - Helsinki University of Technology, Report TTK-V-B99, S. 67-103, 1994.
- /ERI 95/ Eriksson, G.; Spencer, P.J.; Sippola, H.: A General Thermodynamic Software Interface. In: Jokilaakso, A. (editor) Proceedings of the 2nd Colloquium on "Process Simulation" in Espoo, Finland. - Helsinki University of Technology, Report TTK-V-B104, p. 113, 1995.
- /FEI 99/ Fein, E.; Schneider, A. (eds.): d³f - Ein Programmpaket zur Modellierung von Dichteströmungen. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-139, Köln, 1999.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /FEI 04/ Fein, E. (ed.): Software Package r³t. Model for Transport and Retention in Porous Media. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-192, Köln, 2004.
- /GRI 02/ Gribi, P. et al.: Project Opalinus Clay. Models, Codes and Data for Safety Assessment. - TR 02-06 Nagra, Wettingen, 2002.
- /GRS 08/ Buhmann, D.; Mönig, J.; Wolff, J.: Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien- Teilbericht zum Projekt ISIBEL. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-233, Köln, 2008.
- /HEL 97/ Helmig, R.: Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface. - Springer-Verlag, 1997.
- /HIR 99/ Hirsekorn, R.P.; Boese, B.; Buhmann, D: LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-157, Köln, 1999.
- /HOC 03/ Hoch, A.R.: NAMMU Release 7.2 User Guide. - SA/ENV-0627. Serco Assurance, Oxfordshire, UK, 2003.
- /IAE 94/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety indicators in different time frames for the safety assessment of underground radioactive waste repositories. - IAEA-TECDOC - 767; Vienna, 1994.
- /IAE 99/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Critical groups and biospheres in the context of radioactive waste disposal. - Fourth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-1077, Vienna, 1999.
- /IAE 03a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): "Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal. - Report of BIOMASS Theme 1 of the Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS) Programme, Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS). - IAEA-BIOMASS-6, Vienna, 2003.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /IAE 03b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal. - Sixth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal. - IAEA-TECDOC-1372; Vienna, 2003.
- /ICR 85/ International Commission of Radiological Protection (ICRP): Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste. - ICRP-Publication 46, 1985.
- /ICR 00/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. - ICRP Publication 81, Annals of the ICRP Volume 28, No. 4, Elsevier (Pergamon Press), 2000.
- /ICR 06/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): Assessing Dose of the Representative Individual for the Purpose of Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101, 2006.
- /KIN 92/ Kinzelbach, W.: Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser. - 2. Aufl., R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1992.
- /KOL 97/ Kolditz, O.: Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluftgestein. - Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 1997.
- /KOL 03/ Kolditz, O. et al.: ROCKFLOW Manual RFD Input Description Version 3.9 First Draft. - Centre for Applied Geosciences University of Tübingen, Institute of Fluid Mechanics and Computer Applications in Civil Engineering University Hannover. Tübingen/Hannover, 2003.
- /KÜH 96/ Kühle, T.; Zude, F.; Lührmann, L.: Das eindimensionale Transportprogramm CHET1 unter der Berücksichtigung der Sorption nach dem K_d -Konzept. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-124, Köln, 1996.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /KUL 02/ Kull, H. u. a.: Two-Phase-Flow Experiment in the Fractured Rock of the HRL Äspö. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-183, Köln, 2002.
- /LÜH 96/ Lührmann, L.; Noseck, U.: Das eindimensionale Transportprogramm CHET2 unter Berücksichtigung nichtlinearer, elementspezifischer Gleichgewichtssorption. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-125, Köln, 1996.
- /LÜH 99a/ Lührmann, L.: Modellierung des kolloidgetragenen Schadstofftransports unter Berücksichtigung von Sorptions- und Filtrationsprozessen: - Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1999.
- /LÜH 99b/ Lührmann, L.: Modellierung des kolloidbeeinflussten Schadstofftransports mit dem Rechenprogramm TRAPIC. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-149, Köln, 1999.
- /LÜH 00/ Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R.: Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a Hypothetical Repository in Crystalline Formations in Germany. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Köln, 2000.
- /MAR 86/ de Marsily, G.: Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. - 1. Aufl.; Academic Press; San Diego u. a., 1986.
- /MAR 99/ Marschall, P. u. a.: Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN). - NAGRA Technical Report 99-07, Wettingen, Schweiz, 1999.
- /MAZ 03/ Mazurek, M.; Pearson, F.J.; Volckaert, G.; Bock, H.: Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. - NEA, No. 4437, Paris, 2003.
- /MOR 01/ Morén, L.; Pässe, T.: Climate and shoreline in Sweden during Weichsel and the next 150,000 years. - SKB Technical Report TR-01-19. Stockholm, 2005.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /MÜL 99/ Müller-Lyda, I.; Birthler, H.; Fein, E.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-148, Braunschweig, 1999.
- /NAG 85/ NAGRA (Hg.). Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985. - Nagra Gewähr Bericht NGB 85-01, Baden, Schweiz, 1985.
- /NAG 02a/ Arbeitsgemeinschaft Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle / Colenco Power Engineering AG / Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten - Schlussbericht. - Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz BfS, Wettingen, 15. Mai 2002.
- /NAG 02b/ Nagra: FEP management for the Opalinus Clay safety assessment. - Nagra Technical Report NTB 02-23, Wettingen, 2002.
- /NAG 02c/ National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (NAGRA): Project Opalinus clay - Safety Report - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). - NAGRA Technical Report 02-05, Wettingen, 2002.
- /NAG 02d/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. - Wettingen, 2002.
- /NEA 97/ Nuclear Energy Agency (NEA): Lessons learned from ten performance assessment studies. - Paris, 1997.
- /NEA 99/ NEA: An International Database of Features, Events and Processes. - NEA-& OECD, Wien, 1999.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /NEA 00/ Nuclear Energy Agency (NEA): Features, Events and Processes (FEP) for Geological Disposal of Radioactive Waste: An International Database. - Nuclear Energy, Vol. 2000, No. 14, pp. 1-90, OECD-NEA, Paris, 2000.
- /OEC 00/ Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): Features, Events and Processes (FEP) for Geologic Disposal of Radioactive Waste, An International Database. - OECD, Paris, 2000.
- /OEC 03/ Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. - Report NEA4437 prepared by Mazurek, M.; Pearson, F.J.; Volckaert, G., Bock, H., OECD, Paris, 2003.
- /OEC 05/ Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): Features, Events and Processes (FEP) for Geologic Disposal of Radioactive Waste Version 1.0. - OECD, Paris, 2005.
- /OND 01/ ONDRAF/NIRAS: SAFIR 2. Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. - NIROND 2001-6E, Brüssel, Dezember 2001.
- /PAG 88a/ Storck, R.; Aschenbach, J.; Hirsekom, R.P.; Nies, A.; Stelte, N.: PAGIS - Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste - Disposal in Salt formations. - Commission of the European Communities, Brüssel/Luxemburg, 1988.
- /PAG 88b/ Marivoet, J.; Bonne, A.: PAGIS - Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste - Disposal in Clay Formations. - Brüssel/Luxemburg, 1988.
- /PAP 88/ Papelis, C.; Hayes, K.F.; Leckie, J.O.: HYDRAQL: A program for the computation of chemical equilibrium composition of aqueous batch systems including surface-complexation modelling of ion adsorption at the oxide/solution interface. - Dep. of Civil Eng. Stanford Univ., Stanford, CA, Technical Report No. 306, 1988.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /PAR 99/ Parkhurst, D. L.; Appelo, C.A.J: User's Guide to PHREEQC (Version 2) - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, one-dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. - Water-Resources Investigations Report 99-4259, Denver, Colorado, 1999.
- /PRU 06/ Pruess, K.; Oldenburg, C.; Moridis, G.: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. - Berkeley, California, 2006.
<http://www-esd.lbl.gov/TOUGH2/>
- /PSE 83/ Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Sicherheitsstudien Entsorgung - Zusammenfassender Abschlussbericht. - Karlsruhe, 1983.
- /RSK 08/ Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK zum GRS-Bericht „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“. - RSK408, Info-7 / SSK-224 vom_03-07-08.
- /SCH 61/ Scheidegger, A. E.: General theory of dispersion in porous media. - J. Geophys. Res., 66 (10), 3273-3278, 1961.
- /SCH 02/ Schneider, J.; Zuidema. P.: Projekt Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). - Nagra, TR 02-05, Wettingen, 2002.
- /SKB 83/ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): "Final Storage of Spent Nuclear Fuel - KBS-3, vol. I: GENERAL ; vol. II: GEOGLOGY ; vol. III: BARRIERS; vol. IV: Safety". - Swedish Nuclear Fuel Supply Co/Division KBS, Stockholm , Sweden, May 1983..
- /SKB 06/ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. - Main Report of the SR-Can project. - Technical Report 06-09, Stockholm, 2006.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- /SKR 05/ Skrzyppek, J. et al.: Untersuchung der menschlichen Einwirkungen auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und der damit verbundenen Auswirkungen auf die Führung des Nachweises der Langzeitsicherheit - Abschlussbericht. - Colenco Power Engineering AG, Bericht (erstellt Im Auftrag des BfS, Stand 31.05.2005), Colenco Bericht 3184/11, 63 S., Baden, Schweiz, 2005.
- /SPR 06/ Spring 3.2 Simulation of Processes in Groundwater Benutzerhandbuch. <http://www.delta-h.de/software/spring/index.htm>, Dortmund, 2006.
- /SSK 02/ Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlagersicherheitskriterien; Stellungnahme der Strahlenschutzkommission und der Reaktor-Sicherheitskommission; verabschiedet in der 182. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 04.-06. Dezember 2002.
- /STO 85a/ Storck, R. u. a.: Modellansätze und Ergebnisse zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock. In: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlußbericht, Fachband 16. - Hahn-Meitner Institut, Berlin 1985.
- /STO 85b/ Storck, R.; Hossain, S.; Podtschaske, T.; Rimkus, D.; Stelte, N.; Weber, P.: Einzeluntersuchungen zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock. In: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlußbericht: Fachband 15. - Hahn-Meitner Institut, Berlin, 1985.
- /STO 96/ Storck, R.; Buhmann, D.; Hirsekorn, R.P.; Kühle, T.; Lührmann, L.: Das Programmpaket EMOS zur Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Version 5. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-122, Köln, 1996.
- /VOI 98/ Voigt, H.J.; Wippermann, T.: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 6, Geochemie. - Springer Verlag, 1998.
- /VOS 03/ Voss, C. I.; Provost, A.M.: SUTRA, A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport. - U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4231, Reston, Virginia, 2003.

/WOL 92/ Wolery, T.J.; Daveler, S.A.: EQ6: A Computer Code for Reaction-Path Modeling of Aqueous Geochemical Systems. Theoretical Manual, User's Guide, and Related Documents (Version 7.0). - Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, 1992.

6 Weiterführende Literatur

(Hinweis: Dieses Verzeichnis enthält als Ergänzung wichtige weiterführende Literatur zum Thema dieses Anhangs, die in diesem Anhang nicht explizit zitiert wurde. Zitierte Literatur findet sich im "Literaturverzeichnis")

AECL: Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste. - AECL-10711, COG-93-1, 1994.

Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. - Empfehlungen des AkEnd. - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, im Auftrag des BMU, 260 S., Köln, 2002.

Bailey, L.E.F.; Billington, D.E.: Overview of the FEP Analysis Approach to Model Development. - United Kingdom Nirex Limited, Nirex Science Report S/98/009, 1998.

Baltes, B.; Heuser, H.; Kindt, A.; Thomas, W.: Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Entwurf Stand 12.03.2002. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2002.

Baltes, B.; Mohiuddin, G.: Langzeitberechnung des Globalverhaltens eines Salzstockes bei Einlagerung hochradioaktiver Stoffe. - GRS-A-881, 31 S., Köln, 1983.

Baltes, B.; Röhlig, K.J.: Szenarienanalysen im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. - GRS-A-2633, Köln, 1998.

Baltes, B.; Röhlig, K.J.: The safety case for deep geological disposal: GRS views on regulatory requirements and practice. EUROSAFE 2005, Köln. - Abrufbar unter www.eurosafeforum.org/forums/eurosafe_seminars.html?download_filename=../products/data/5/pe_394_24_1_seminar5_01_2005.pdf&download_tagetname=seminar5_01_2005.pdf am 08.08.08

Bear, J.; Tsang, C.F.; de Marsily, G. Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. - 1. Aufl.; Academic Press; San Diego u. a.; 1993.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- Becker, A.; Fischer, H.; Hofer, C.; Kloos, M.; Krzykacz, B.; Martens, K.H.; Röhlig, K.J.: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: Everest project. Volume 3a: Salt formation, site in Germany. - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 17449/3a EN, Luxembourg, 1997.
- Becker, D.A. u. a.: Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN). - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 19965, Luxembourg, 2002.
- Becker, D.A.: Entwicklung und Anwendung eines Nahbereichsmodells zur Analyse der Langzeitsicherheit von Salzkavernen mit chemisch-toxischen Abfällen. - GRS-128, 134 S., Köln, 1996.
- Birthler, H.; Fein, E.; Schneider, A.: Validierung von Einzeleffekten in Grundwassermodellen. - GRS-150, 99 S., Köln, 2000.
- Boese, B.; Buhmann, D.: Einfluß von Stützversatz und anderen technischen Maßnahmen auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salinar. - GRS-162, 116 S., Köln, 2000.
- Boese, B.; Buhmann, D.; Hirsekorn, R.P. u.a.: Weiterentwickelte Modellansätze chemischer und physikalischer Effekte im Grubengebäude eines Endlagers im Salinar. - GRS-123, 144 S., Köln, 1996.
- Boese, B.; Hirsekorn, R.P.; Storck, R.: Vergleich der Rechenprogramme LOPOS und MARNIE. - GRS-169, 75 S., Köln, 2000.
- Bork, M.: Bewertungsmaßstäbe für die Betriebs- und Langzeitsicherheit von geologischen Endlagern. - GRS-A-2643, 27 S., Köln, 1998.
- Bork, M.: Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. Konzepte und Anwendungen. - GRS-A-2731, 39 S., Köln, 1999.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

- Brenner, J.; Buhmann, D.; Kühle, T.: Einfluß netzwerkartiger Strukturen der Gruben-
hohlräume auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salinar. - GRS-
163, 102 S., Köln, 2000.
- Brewitz, W.; Buhmann, D.; Fein, E. u.a.: Erarbeitung und Bewertung der wissenschaft-
lichen Grundlagen zur Sicherheitsanalyse eines Endlagers in der Nachbe-
triebsphase. - GRS-136, 61 S., Köln, 1996.
- Buhmann, D.: Das Programmpaket EMOS. Ein Instrumentarium zur Analyse der Lang-
zeitsicherheit von Endlagern. - GRS-159, 41 S., Köln, 1999.
- Buhmann, D.; Becker, D.A.; Keesmann, S. u.a.: Aktualisierung sicherheitsanalytischer
Rechenprogramme für Teilsysteme eines Endlagers. - GRS-200, 139 S.,
Köln, 2004.
- Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkon-
zepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. - GSF-Bericht 27/91,
Neuherberg, 1991.
- Buhmann, D.; Pavelescu, M.; Ionescu, A. u.a.: Comparison of Long-Term Safety of
Repositories for Spent CANDU or LWR Fuels in Hard Rock. - GRS-196, 79
S., Köln, 2003.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Eignungsuntersu-
chung Gorleben. -
[http://www.bgr.bund.de/cIn_030/nn_458552/DE/Themen/Geotechnik/Projek-
te/Endlagerstandorte/Erkundung.html](http://www.bgr.bund.de/cIn_030/nn_458552/DE/Themen/Geotechnik/Projekte/Endlagerstandorte/Erkundung.html)
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Langzeitsicherheitsanalyse für
ein HAW-Endlager im Salz - Nachweis der Integrität der geologischen Bar-
riere. Beitrag für das Projekt ISIBEL. Tagebuch-Nummer 10403/08. Bun-
desanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 31.09.2007
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Bundesbericht Forschung
2004. - Berlin, 2004.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitstechnische Einzelfragen zur Endlagerung, Stand: November 2001. - 2002. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/atomkraft_sicherheit_st_einzelfragen.pdf (04. Dez. 2006).

Chapman, N.; Andersson, J.; Robinson, P.; Skagius, K.; Wene, C.O.; Wiborgh, M.; Wingefors, S.: Systems analysis, scenario construction and consequence analysis definition for SITE-94. - Statens Kärnkraftinspektion, SKI 95:26, 1995.

Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA): Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). - 2005. <http://www.ksa.admin.ch/website/pdf/KSA-Stellungnahme%20EN2002.pdf> (05. Dez. 2006)

Fahrenholz, C.: Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in einem Festgesteinskörper vor dem Hintergrund sicherheitsanalytischer Fragestellungen bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. - Dissertation, Universität Braunschweig, 2006.

Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK): Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel. - Guide YVL 8-4, 2001.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. Abschlußbericht. Fachband 1: Reststoff- und Formationsauswahl. - GRS-140/1, Köln, 1998.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. Abschlußbericht. Fachband 2: Geochemische Daten. - GRS-140/2, Köln, 1998.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. Abschlußbericht. Fachband 3: Hydraulische Daten und Stofftransport. - GRS-140/3, Köln, 1998.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. Abschlussbericht. Fachband 4: Rechenmethoden zur Modellierung von Transportvorgängen. - GRS-140/4, Köln, 1998.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Entwicklung und Anwendung analytischer Methoden zur Eignungsuntersuchung der Verbringung bergbaufremder Rückstände in dauerhaft offene Grubenräume im Festgestein. Abschlussbericht. Fachband 5: Methodenanwendung. - GRS-140/5, Köln, 1998.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS): Organisation der Endlagerforschung im Hinblick auf die Entwicklung politischer Zielsetzungen, die Aufgaben des Antragstellers und die Belange der Genehmigung/Aufsicht. - Fachband zu AP 1.6 - SR 2435 "Politik- und Management-Unterstützung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle". - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3132, Köln, 2006.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - überarbeitete Diskussionsgrundlage. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2990, Köln, 2002.

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA. - HSK 23/73, Würenlingen, Schweiz, 2004.

Hedin, A.: Spent nuclear fuel - how dangerous is it? A report from the Project "Description of risk". - SKB 97-13, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, 1997.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

Herrmann, A.G.: Radioaktive Abfälle. - Berlin/Heidelberg, 1983.

Herrmann, A.G.; Röthemeyer, H.: Langfristig sichere Deponien. - Berlin/Heidelberg, 1998.

Hunsche, U.; Schulze, O: Das Kriechverhalten von Steinsalz. - Kali und Steinsalz, Vol. 11 (8/9), 238-255, 1994.

International Atomic Energy Agency (IAEA): The Principles of Radioactive Waste Management. - Safety Series No. 111 - F, IAEA, Vienna, 1995.

International Atomic Energy Agency (IAEA): Topical issues in nuclear radiation and radioactive waste safety, Topical issue 5: Radiation safety in the distant future: The issue of the disposal of long-lived waste. - Proceedings of an international conference 31.8. - 4.9.1998, Vienna, 1998.

Japanese Nuclear Cycle Research Institute JNC: H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. - TN 1410 2000-001 (Project Overview Report), 2000.

Jones, C.; Wiborgh, M.; Andersson, J.: Sicherheitsindikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. - Abschlussbericht im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz, Stockholm, 2004.

Keller, S.: Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz - Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz. Tagebuch-Nummer 11614/05. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 31.07.2007

Keller, S.: Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland) - Zusammenstellung von geologischen, klimatischen und hydrogeologischen ZEP. 1. Zwischenbericht, F + E Endlagerung 9Y321503000. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2002.

Kinzelbach, W.; Rausch, R.: Grundwassermodellierung. Eine Einführung mit Übungen. - 1. Aufl., Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart, 1995.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

Kosakowski, G.: Time-dependent flow and transport calculations for Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis). - PSI Bericht Nr. 04-10, 2004.

Kühle, T.; Graefe, V.; Hirsekorn, R.P.: Zweiphasenfluß-Modellrechnungen zur Berücksichtigung der Gasproduktion in Endlagern und Modellansätze für Langzeitsicherheitsanalysen. - GRS-158, 111 S., Köln, 1999.

Kull, H.; Flach, D.; Graefe, V.: Zweiphasenflussbedingungen in einer homogenen granitischen Gesteinsmatrix. Abschlussbericht. - GRS-172, 157 S., Köln, 2001.

Lambers, L.: Szenarienanalysen im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3172, Köln, 2004.

Lange, F.; Gründler, D.; Schwarz, G.: Transportstudie Konrad: Sicherheitsanalyse des Transports radioaktiver Abfälle zum Endlager Konrad. - GRS-84, 141 S., Köln, 1991.

Little, R.; Robinson, P.; Humphreys, P.; Schneider, J.: The Application of the AMBER Software Tool to the Geological Disposal of Radioactive Waste. - 6th Slovak-Czech Seminar on the Geological Disposal of Radioactive Waste, Piestany, 26-28 August 2003.

Müller-Hoeppe, N.; Raitz, R.; Frentz, V.; Niehaus, N.; Krone, J.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager, Risikobezogene Bewertung begrenzter Freisetzungen. - Abschlussbericht, technischer Anhang 1. - Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, 1999.

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Kristallin-I - Safety Assessment Report. - NTB 93-22E, 1994.

Noseck, U.: Auswertung von Sorptionsdaten hinsichtlich nichtlinearer Sorptionsmodelle für die Nuklid Ausbreitung im Deckgebirge. - GRS-134, 57 S., Köln, 1996.

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

Noseck, U.: Gegenüberstellung einiger Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Granit- und Salzformationen. - GRS-135, 79 S., Köln, 1996.

Noseck, U.; Brewitz, W.; Becker, D.A.; et al: Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. - GRS-153, 145 S., Köln, 2000.

Nuclear Energy Agency (NEA) / Radioactive Waste Management Committee: Integration Group for the Safety Case (IGSC). Proceedings on Safety Case, IGSC Topical Session held 25th November 2001 Paris-France, NEA/RWM/IGSC(2002)1, Paris, 2002.

Nuclear Energy Agency (NEA) / Radioactive Waste Management Committee: Integration Group for the Safety Case (IGSC). Topical Session Proceedings of the 5th IGSC meeting on: Observations regarding the Safety Case in Recent Safety Assessment Studies, held on 5th October 2003 in Paris, France NEA/RWM/IGSC(2004)3, Paris, 2004.

Nuclear Energy Agency (NEA): Establishing and Communication Confidence in the Safety of Deep Geological Disposal. Approaches and Arguments, Paris, 2002.

Nuclear Energy Agency (NEA): Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies, Paris, 1997. - Abrufbar unter:
<http://www.nea.fr/html/rwm/reports/1997/ipag.pdf> am 17.06.2008 am 08.08.2008.

Nuclear Energy Agency (NEA): SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste - An International Peer Review. - Paris, 2003.

Nuclear Energy Agency (NEA): Scenario Development Methods and Practice. An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development. - Madrid, 1999.

OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Geological Disposal of Radioactive Waste. - Review of Developments in the Last Decade. - OECD, Paris, 1999.

OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Steering Committee for Nuclear Energy: Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal. - A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee. - OECD, Paris, 1995.

OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Technical appraisal of the Current Situation in the Field of Radioactive Waste Management. - A Collective Opinion by the Radioactive Waste Management Committee. - Paris, 1985.

OECD/NEA: Systematic Approaches to Scenario Development, Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories. - OECD/NEA, Paris, 1992.

Plummer, L.N.; Parkhurst, D.L.; Fleming, G.W.; Dunkle, S.A.: A Computer Program Incorporating Pitzer's Equations for Calculation of Geochemical Reactions in Brines. - U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 88-4153, Reston, Virginia, 1988.

Pröhl, G.; Olyslaegers, G.; Zeevaert, T.; Kanyar, B.; Pinedo, P.; Simón, I.; Bergström, U.; Hallberg, B.; Mobbs, S.; Chen, Q.; Kowe, R.: Biosphere Models for Safety Assessment of radioactive waste disposal based on the application of the Reference Biosphere Methodology. - BioMoSA. - EC contract: FIKW-CT2001-20184, 2004.

Projekträger Forschungszentrum Karlsruhe - Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE): Aufgaben. - <http://www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=FZK&node=0678>, 8.2.2007

Projekträgerschaft Wassertechnik und Entsorgung (PtWT+E): Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2002 - 2006), Förderkonzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. - Karlsruhe, 2001.

Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): RSK-Stellungnahme zum Synthesebericht des BfS „Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wirtsgesteine im Vergleich“. - 13.09.2006 (395. Sitzung). - Bonn, 2006. <http://www.rskonline.de/stellungnahmen/ST-synthesebericht.pdf>

Anhang Langzeitsicherheitsanalyse

Röhlig, K.J.: The UK Nirex Approach to Scenario Analysis. Summary and Conclusions of a Workshop held in Köln on November 22-26, 1999. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2772, Köln, 2000.

Rübel, A.; Müller-Lyda, I.; Storck, R.: Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Endlagerung. - GRS-203, 55 S., Köln, 2004.

Rübel, A.; Noseck, U.; Müller-Lyda, I. u.a.: Konzeptioneller Umgang mit Gasen im Endlager. - GRS-205, 67 S., Köln, 2004.

Stenhouse, M.; Chapman, N.; Sumerling, T.: Scenario development FEP audit list preparation: Methodology and presentation. - Statens Kärnkraftinspektion, SKI 93:27, 1993.

Storck, R.; Aschenbach, J.; Hirsekorn, R.P.; Nies, A.; Stelte, N.: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste (PAGIS): Disposal in Salt Formations. - Office for Official Publications of the European Communities, EUR 11778 EN, Luxembourg, 1988.

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Geosphere Performance Indices: Comparative measures for site selection and safety assessment of deep waste repositories. - Technical Report TR-99-01, Stockholm, 1999.

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Deep repository for spent nuclear fuel SR 97 - Post-closure safety Main Report. - Technical Report TR-99-06, Stockholm, 1999.

Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI): SITE 94 - Deep Repository Performance Assessment Project. - SKI Report 96:36, Stockholm, 1996.

Texier, D.; Degnan, P.; Loutre, M.F.; Paillard, D.; Thorne, M.: Modelling Sequential BIOSphere Systems under CLIMate Change for Radioactive Waste Disposal. Project BIOCLIM. - Paris, 2003.
<http://www.andra.fr/bioclim/publications/LasVegas.pdf>

Tix, C.; Hirsekorn, R.P.: Auswertung von In-situ-Konvergenz-Daten und Ableitung eines Konvergenzansatzes. - GRS-133, 39 S., Köln, 1996.

Verordnung über Vorausleistungen für die Einrichtung von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (Endlagervorausleistungsverordnung - EndlagerVIV). - Vom 28. April 1982 (BGBl. I S. 562), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 6. Juli 2004 (BGBl. I S. 1476).

Vieno, T. Nordman, H.: FEP and scenario. Auditing of TVO-92 and TILA-96 against International FEP database. - Posiva Oy, POSIVA 97-11, Helsinki, 1997.

Vieno, T.; Norman, H.: Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hästholmen, Kivetti, Olkiluoto and Romuvaara. - TILA-99. Posiva 99-07, 1999.

Wallner, M. u. a.: Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein. Deutsch-russische wissenschaftliche Zusammenarbeit zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. - GRS-BGR-DBETEC 01/2005; DBE Technology GmbH, Peine, 2005.

Weber, J.-R.; Keller, S.: FEP-Generierung und Szenarientwicklung. Stand November 2006. Beitrag für das Projekt ISIBEL. Auftrag-Nummer AP 9Y3213060000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 25.02.2008

Westall, J.C.; Zachary, J.L.; Morel, F.M.M.: MINEQL - A Computer Program for the Calculation of Chemical Equilibrium Compositions of Aqueous Systems. - MIT Technical Note No. 18, 1976.

Zwirner, R.; Zirngast, M.; Köthe, A.: Der Aufbau des Deckgebirges und die Strukturentwicklung des Salzstocks Gorleben. - Z. geol. Wiss. 32 (5/6), 327-351, Berlin, 2004.