

Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

Langzeitsicherheitsnachweis für Endlager in geologischen Formationen



30.09.2008

Bearbeiter:

Minhans, A.

Sailer, M.

Schmidt, G.

Unter Mitarbeit

von:

Rübel, A.

Brasser, T

**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	Prinzipien und Rolle des Langzeitsicherheitsnachweises	4
2.1	Sicherheitsnachweise für ein Endlager	4
2.2	Elemente des Langzeitsicherheitsnachweises.....	5
3	Vorgehen bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises	11
3.1	Überblick über die Schritte bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises	11
3.2	Konzeptuelle Modelle	13
3.3	Numerische Modelle	18
3.4	Konsequenzenanalysen	21
3.5	Methodik und Instrumente.....	22
4	Sicherheitsanalytische Bewertungen zu den Barriereeigenschaften – Referenzkonzepte für Steinsalz, Tonstein und Granit	39
4.1	Geologische Barrieren	40
4.2	Geotechnische Barrieren	66
4.3	Technische Barrieren	73
4.4	Zusammenwirken des Barrierensystems bei verschiedenen Referenzkonzepten	79
5	Forschung und Entwicklung für den Langzeitsicherheitsnachweis ..	84
5.1	Die Rolle von Forschung und Entwicklung beim Langzeitsicherheitsnachweis	84
5.2	Organisation von Forschung und Entwicklung für sicherheitsanalytische Untersuchungen.....	88
5.3	Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der sicherheitsanalytischen Untersuchungen.....	91
5.4	Neue Schwerpunkte in der Endlagerforschung.....	93

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

6	Literatur.....	96
7	Weiterführende Literatur	102

1 Einleitung

Mit dem Langzeitsicherheitsnachweis für ein geologisches Endlager muss der Nachweis darüber erbracht werden, dass es in der Nachbetriebsphase des Endlagers durch die eingelagerten Abfälle zu keiner unzulässigen Beeinträchtigung von Mensch und Umwelt kommt.

Dieser Anhang beschreibt die wesentliche Rolle, die grundlegenden Zusammenhänge beim Langzeitsicherheitsnachweis und, zusammen mit Anwendungsbeispielen, die sicherheitsanalytischen Bewertungen zu den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tonstein und Granit. Außerdem werden die Rolle und der Stand von Forschung und Entwicklung beim Langzeitsicherheitsnachweis dargestellt. Die detaillierten Methoden und Werkzeuge, die bei der quantitativen Langzeitsicherheitsanalyse eingesetzt werden, und ihre wissenschaftlichen Grundlagen sind in einem anderen Anhang „Langzeitsicherheitsanalyse“ dargestellt.

Die Prinzipien und die Rolle des Langzeitsicherheitsnachweises sind in Kapitel 2 erläutert. Hier wird die zentrale Bedeutung des Einschlusses für die Langzeitsicherheit begründet, beschrieben und eingeordnet.

In Kapitel 3 ist das übergeordnete Vorgehen bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises beschrieben mit der Herleitung von Szenarien und dem Zusammenhang mit den quantitativen Analysen.

In Kapitel 4 werden die Barriereigenschaften der Wirtsgesteine, geotechnischen Barrieren und technischen Barrieren unter sicherheitsanalytischen Gesichtspunkten diskutiert. Die Bewertungen zu Wirtsgesteinen sind durch einige ausgewählte Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen aus verschiedenen Ländern veranschaulicht.

Der Stand von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Endlagerung ist in Kapitel 5 dargestellt, dabei werden der erreichte Stand und die noch offenen Fragen bewertet.

2 Prinzipien und Rolle des Langzeitsicherheitsnachweises

Der Sicherheitsnachweis für ein Endlager umfasst im weitesten Sinne die Phasen Errichtung, Betrieb einschließlich Verschluss und Nachbetrieb. Das System der Sicherheitsnachweise für ein Endlager ist im Überblick in Kapitel 2.1 beschrieben.

Die Sicherheitsanalysen für die Phasen Errichtung und Betrieb einschließlich der Einrichtung der Verschlüsse unterscheiden sich wenig von den Sicherheitsanalysen bei anderen kerntechnischen Anlagen, hinzu kommen lediglich zusätzliche Anforderungen aus der bergbaulichen Sicherheit.

Unter dem Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager versteht man den Nachweis für die Nachbetriebsphase des Endlagers. Der Nachbetrieb ist diejenige Phase, bei der das Endlager verschlossen vorliegt und in der keine geplanten Eingriffe in das Endlagersystem mehr vorgesehen sind. Für den Nachbetrieb ist der Nachweis zu führen, dass es im Nachweiszeitraum nicht zu einer Überschreitung von festgelegten Schutzzielelementen kommen kann. Der Nachweis kann sich dabei auf unterschiedliche zentrale Elemente stützen. Diese Elemente sind in Kapitel 2.2 beschrieben.

2.1 Sicherheitsnachweise für ein Endlager

Der Langzeitsicherheitsnachweis ordnet sich ein in eine Reihe von Sicherheitsnachweisen, die für den Betrieb und den Nachbetrieb eines Endlagers zu führen sind. Die wichtigsten Nachweise sind in Abb. 1 zusammengestellt. Sie werden nach

- radiologischen und nicht-radiologischen Nachweisen, sowie nach
- solchen, die für die Betriebsphase einschließlich der Einrichtung der Verschlüsse zu führen sind, und solchen, die sich auf die Nachbetriebsphase beziehen,

differenziert.

Die Abbildung zeigt, dass die zu erbringenden Nachweise klar abgrenzbar sind und sich systematisch ergänzen: jede der vier Nachweisarten bezieht sich auf verschiedene Schutzbereiche und verschiedene Zeiträume.

Adressaten der Nachweise sind formal die für das jeweilige Fachgebiet zuständigen Behörden. Sie haben die vorgelegten Nachweise zu prüfen. Sie können Änderungen

oder Ergänzungen verlangen und die Nachweise als geführt bestätigen oder deren Bestätigung versagen. Beim derzeit geltenden Planfeststellungsverfahren sind die bestätigten Nachweise mit erteiltem Planfeststellungsbeschluss verbindlich.

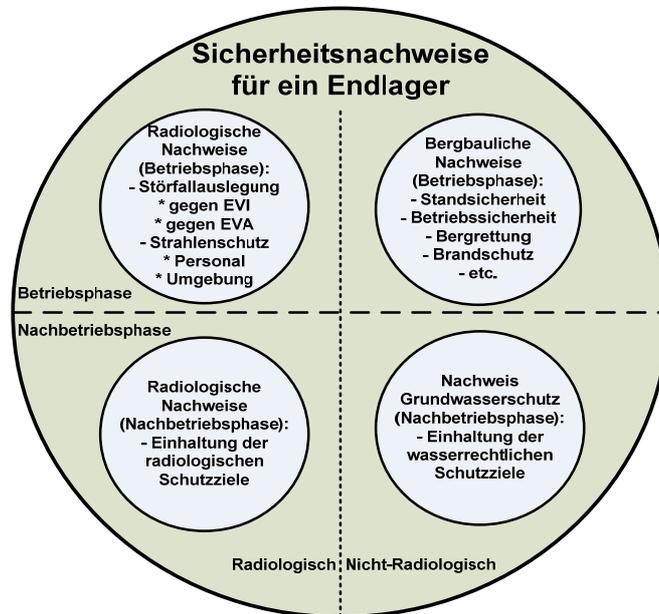


Abb. 1: Sicherheitsnachweise für ein Endlager im Überblick

In der Abbildung nicht dargestellt ist die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Bei der Umweltverträglichkeitsprüfung sind die Auswirkungen der Anlage Endlager auf die Schutzgüter zu prüfen.

Alle geführten Nachweise, gegebenenfalls ergänzt durch übersichtliche Kurzdarstellungen oder auf bestimmte Zielgruppen bezogene Darstellungen, sind Teil des „Safety Case“ für das Endlager. Dieser Safety Case ist im gleichnamigen Anhang ausführlicher behandelt.

2.2 Elemente des Langzeitsicherheitsnachweises

Ziel des Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager ist letztlich der Nachweis gegenüber der Planfeststellungsbehörde, dass das nach Abschluss der Einlagerung verschlossene Endlager unter Berücksichtigung aller spezifischen Standort- und Wirtsgesteinseigenschaften, der in der geologischen Zukunft zu erwartenden Ereignisse und aller Wahrscheinlichkeit nach ablaufenden Veränderungsprozesse sicher ist und bleibt.

Im Folgenden werden verschiedene wichtige Elemente des Langzeitsicherheitsnachweises erläutert.

Der Langzeitsicherheitsnachweis gilt als geführt, wenn für den erforderlichen Zeitraum nachgewiesen ist, dass entweder keine Radionuklide den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen können („vollständiger Einschluss“) oder die vom Endlager ausgehenden Radionuklide in der Biosphäre nur zu vernachlässigbaren Expositionen für Mensch und andere Lebewesen führen können („sicherer Einschluss“).

2.2.1 Rolle der Barrieren im Langzeitsicherheitsnachweis

Beim Nachweis der Langzeitsicherheit ist gefordert, nur solche Aussagen heran zu ziehen, die über den notwendigen Zeitraum hinweg zuverlässig und im wissenschaftlichen Sinne zweifelsfrei prognostizierbar sind und deren Robustheit belegt werden kann.

In der internationalen Praxis sind zwei unterschiedliche Hauptrichtungen der Nachweisführung entstanden:

- die Nachweisführung vorrangig über die geologische Barriere (Undurchlässigkeit bzw. Rückhalteigenschaften geologischer Schichten),
- die Nachweisführung vorrangig über technische Barrieren (Behälter in Kombination mit wichtigen Abdichtelementen).

Die Nachweisführung vorrangig über die geologische Barriere setzt voraus, dass

- entsprechend geologische Schichten vorhanden sind, bei denen ein hohes geologisches Alter und geringe hydraulische Durchlässigkeiten kombiniert sind,
- diese geologischen Verhältnisse nachweisbar über sehr lange Zeiträume (viele Zehnermillionen Jahre) stabil blieben und keine Hinweise darauf vorliegen, dass sich diese Verhältnisse künftig (innerhalb der nächsten Million Jahre) rasch verändern,
- diese geologischen Schichten mit einem vertretbaren Untersuchungsaufwand auch auffindbar sind.

Entsprechende Anforderungen in Bezug auf die geologische Langzeitprognose des Isolationspotentials sind in /ALB 04/ vertieft begründet. In Deutschland sind in dieser Hinsicht potentiell geeignete Wirtsgesteine (Steinsalz, Tonstein) vorhanden und Standorte identifizierbar, die diese Anforderungen an die Isolation der hochradioaktiven Abfälle und ihre Prognostizierbarkeit voraussichtlich erfüllen können.

Die Nachweisführung über die Stabilität und die Eigenschaften geologischer Schichten bietet über die Prognostizierbarkeit hinaus noch folgende zusätzliche Vorteile:

- Die Barrierewirkung geologischer Schichten mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit basiert auf relativ einfach zu messenden und zuverlässig vorhersagbaren Stoffeigenschaften (z. B. Diffusionsraten, Konvergenzraten). Die erreichbare Nachweisqualität für viele dieser Eigenschaften ist daher nahezu mit denjenigen vergleichbar, die naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten unterliegen.
- Beiträge durch andere, nur über kürzere Zeiträume zur Verfügung stehende Barrieren (wie z. B. Behälter) oder größeren Schwankungen unterworfenen Barrieren (wie z. B. die bei Klimaveränderungen variierenden Grundwasserverhältnisse im Deckgebirge) stellen zusätzliche Sicherheitsmargen zur Verfügung, sind aber zur Führung des Nachweises nicht mehr zwingend erforderlich.
- Barrieren, deren Wirksamkeit in langfristiger Hinsicht aus kurzfristig (maximal Jahre) angelegten Untersuchungen (z. B. der Korrosionsrate bei Werkstoffen) über Extrapolation auf ihre Stabilität über sehr lange Zeiträume (bis zu einer Million Jahre) nachgewiesen werden muss und für die sich keine wirkliche Entsprechung zu natürlich vorhandenen Systemen findet, müssen in der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises nicht kreditiert werden.
- Von Effekten, die gar keine Barrierewirkung entfalten, sondern auf einfacher Verdünnung (in Grund- und Oberflächenwässern, in Bodenschichten, beim Übergang zwischen verschiedenen Umweltmedien in der Biosphäre) beruhen, muss in deutlich geringerem Umfang oder gar kein Kredit genommen werden.

Aufgrund der genannten Vorteile wird in Deutschland die vorrangige Nachweisführung über die geologische Barriere empfohlen und bereits seit den frühen Anfängen der Fachdiskussion über die Endlagerung schwerpunktmäßig verfolgt. Entsprechend dieser Orientierung wurden durchlässigere Wirtsgesteine (z.B. Granit) in Deutschland nicht mit vergleichbarer Intensität verfolgt. Ähnliches gilt für die damit einhergehende vorrangige Nachweisführung über technische Isolationssysteme (z. B. Behälter).

Mit den Empfehlungen des AkEnd /AKE 02/ wurden die Anforderungen an geologische Isolationssysteme explizit spezifiziert, soweit sinnvoll auch quantifiziert und für Wirtsgesteinauswahl und Eignungsbewertungen von Standorten systematisiert beschrieben.

2.2.2 Nachweisführung über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich als zentrales Element

Als zentrales Schutzelement wird in /AKE 02, BAL 07, RSK 08/ der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) angesehen. Auf seinen Eigenschaften, seinem Erhalt und seiner Einschlussfähigkeit basiert der Langzeitsicherheitsnachweis.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist gemäß /AKE 02, GRS 07/ derjenige Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum - im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren - den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss. In /RSK 08/ wird zusätzlich gefordert, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht größer sein soll als dies zur Erfüllung seiner sicherheitstechnischen Funktion erforderlich ist.

Seine sicherheitstechnische Funktion besteht darin, dass er die endgelagerten radioaktiven Stoffe sicher einschließt. Der Einschluss muss dabei so vollständig erfolgen, dass es zu einer Ver- und Behinderung von Radionuklidfreisetzungen kommt und auch bei langfristig nicht zu vermeidenden Radionuklidfreisetzungen kein erhöhtes Risiko für Mensch und Umwelt resultieren darf /BAL 07/. Aus dieser Anforderung und der sicherheitstechnischen Priorität beim ewG resultieren folgende zentralen Funktionen, die im Langzeitsicherheitsnachweis zu belegen sind:

- **Erhaltungsfunktion:** Der Nachweis basiert zentral auf der geologischen Langzeitprognose für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Nur wenn dessen Langzeitprognose möglich ist, sind das Wirtsgestein und der Standort geeignet. Wenn aber beispielsweise aufgrund geologischer Eigenschaften (Prognostizierbarkeit geologischer Veränderungen), wegen mangelnder Kenntnisse (z. B. wegen grundsätzlichen standortspezifischen Begrenzungen der Erkundbarkeit), zu großen Bandbreiten möglicher künftiger Einwirkungen oder aus anderen Gründen die Prognose nicht zuverlässig möglich ist, dann liegt eine Nichteignung von Wirtsgestein und/oder Standort vor. Diese Nichteignung kann auch nicht durch andere wirksame Barrieren ausgeglichen werden.

- Einschluss- und Rückhaltefunktion: Ergänzend zur geologischen Langzeitprognose und ebenso verlässlich müssen die langfristigen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs belegbar sein, soweit sie einen Einfluss auf die Ausbreitung von Schadstoffen nehmen.

Deshalb müssen in diesem Nachweis folgende Teilaussagen positiv getroffen werden können:

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich, ein ausgewählter Teilbereich des Wirtsgesteins,
 - bleibt über den gesamten Nachweiszeitraum unter allen wahrscheinlichen und zu unterstellenden wirtsgestein- und standortspezifischen künftigen Einwirkungen nachweislich intakt,
 - hält aufgrund seiner nachgewiesenen Durchlässigkeits- bzw. Rückhalteigenschaften den weit überwiegenden Teil der eingelagerten Radionuklide über den gesamten Zeitraum vollständig zurück, und
 - begrenzt die Bewegungsgeschwindigkeit hochmobiler Schadstoffanteile so weit, dass diese nur über lange Zeiträume von 100.000 Jahren und länger verzögert den Gebirgsbereich verlassen können.
- Die Verschlüsse des Endlagers sind so konstruiert und in ihrer Dauerhaftigkeit nachgewiesen, dass sie für den Zeitraum, über den hinweg die Verschlussfunktion nicht auf andere Weise nachweislich erbracht werden wird, die erforderlichen Durchlässigkeitseigenschaften aufweisen. Ihre Qualität und Robustheit muss derjenigen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs angepasst sein und darf dessen Einschlusseigenschaften nicht schwächen.

2.2.3 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich und Zuverlässigkeit der Dosisrechnung

Diese Konzentration auf die zentralen Funktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereich hat zur Konsequenz, dass weiteren Aspekten, die sich in den Resultaten quantitativer Langzeitsicherheitsanalysen abbilden, an Bedeutung verlieren:

- Dem Abfall, seiner Verpackung und der Gestaltung der Einlagerungsbereiche können im Langzeitsicherheitsnachweis Rückhaltefunktionen zugeordnet werden. Für

eine realitätsnahe Modellierung der Vorgänge im Endlager nach Abschluss sind diese Effekte wichtig für verschiedene weitergehende Sicherheitsaussagen. Grundsätzlich muss der Nachweis der Einhaltung von Dosisgrenzen aber im Sinne einer robusten Nachweisgestaltung auch ohne diese Rückhaltefunktionen führbar sein.

- Die Rückhaltung von Radionukliden im Deckgebirge außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, z. B. durch Sorption, kann im Nachweis berücksichtigt werden. Generell muss der Nachweis aber auch ohne solche Effekte führbar sein, weil das Deckgebirge z. B. im Verlauf von Kalt- und Warmzeiten teilweise erheblichen Veränderungen unterliegen kann und deshalb ein Nachweis der Integrität des Deckgebirges an grundsätzliche Grenzen stößt.
- Rückhalte- und Verdünnungseffekte in der Biosphäre spielen im Langzeitsicherheitsnachweis kaum noch eine Rolle, wenn dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich die Priorität zugeordnet wird. Ausbreitungsverzögerungen sind, verglichen mit dem im einschlusswirksamen Gebirgsbereich erreichten Einschluss-, Verzögerungs- und Verdünnungseffekt vernachlässigbar. Beide Effekte wirken sich im Endeffekt auf die Dosis zwar z. B. mit dem Faktor 10 oder 100 aus, der durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich erreichte Rückhalteeffekt liegt aber um Größenordnungen höher.
- Die Variation von Ernährungsgewohnheiten künftiger Generationen fällt im Nachweis ebenfalls weniger ins Gewicht, weil sich Variationen z. B. beim Fischkonsum (dosisbestimmend beim Nuklid I-129) oder anderen besonderen Ernährungsgewohnheiten ebenfalls nur im Bereich von ca. Faktor 10 bemerkbar machen.

Im Langzeitsicherheitsnachweis werden die genannten Effekte berücksichtigt und mit ihren jeweiligen Unsicherheiten bewertet. Der dominante Beitrag eines leistungsfähigen und zuverlässigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zum Nachweis der Langzeitsicherheit führt dazu, dass sich die Unsicherheitsbandbreiten der Gesamtberechnung deutlich verringern.

3 Vorgehen bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises

In diesem Kapitel wird das prinzipielle Vorgehen bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises aufgezeigt.

Der Überblick in Kapitel 3.1 gibt zunächst eine Gesamtschau des Prozesses auf einer relativ abstrakten Ebene.

Die Entwicklung konzeptueller Modelle für den Nachweis ist in Kapitel 3.2 näher beschrieben.

Kapitel 3.3 gibt einen Überblick über Methoden der Quantifizierung, die beim Nachweis der Langzeitsicherheit heute Anwendung finden. Hier wird aufgezeigt, dass verschiedene methodische Instrumente in der Lage sind, eine Aufgabe zu lösen und dabei zu vergleichbaren Ergebnissen zu kommen.

Das Biosphärenmodell mit seinen Bestandteilen, die die verschiedenen Pfade an Exposition durch aus einem Endlager freigesetzte Radionuklide abbildet, und die Bewertung der in der Biosphäre resultierenden Strahlenexposition ist in Kapitel 3.4 dargelegt.

Methodik und Instrumente, die beim Langzeitsicherheitsnachweis eingesetzt werden können, veranschaulicht Kapitel 3.5. Wegen der großen Vielfalt an verfügbaren Methoden und Instrumenten werden hier nur einige Ausgewählte aufgezeigt.

3.1 Überblick über die Schritte bei der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises

Das Vorgehen beim Nachweis der Langzeitsicherheit ist in drei grundlegende Schritte gegliedert, die aufeinander aufbauen. Die Schritte und ihre Zusammenhänge sind in Abb. 2 symbolisch dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

Im ersten Schritt wird ein konzeptuelles Modell der Langzeitsicherheit entwickelt. In diesem Modell sind alle relevanten technischen, geologischen und hydrogeologischen Elemente abgebildet, die für eine Einschätzung von Ausbreitungspfaden und –mechanismen am Standort relevant sein können. Im zweiten Schritt werden diese Aspekte in entsprechenden numerischen Modellen abgebildet. Im dritten Schritt werden

die numerischen Modelle dazu herangezogen, um Konsequenzenanalysen durchzuführen und in Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen die Aussagesicherheit zu untersuchen.

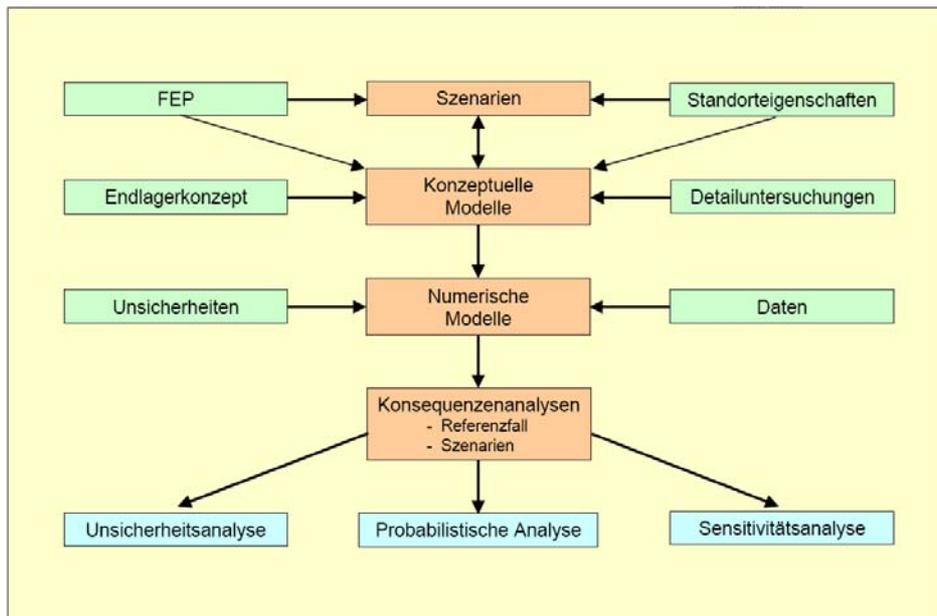


Abb. 2: Stufen bei der Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers

In grüner Farbe sind jeweils wichtige Teilbeiträge dargestellt, die bei der Erstellung der Szenarien sowie der konzeptuellen und numerischen Modelle berücksichtigt werden müssen.

Das Symbol eines Pfeils, der vom konzeptuellen Modell zu den numerischen Modellen führt, stellt eine erhebliche Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse dar. In der Realität sind konzeptuelle Modelle mit ihren Szenarien mit ihrer rechentechnischen Umsetzbarkeit eng verknüpft, und die Fortschritte der rechentechnischen Anwendung wirken auch umgekehrt in die Szenarienanalyse und die konzeptuellen Modelle hinein. Es ist daher mit den Pfeilen lediglich ein „Idealfall“ angedeutet, real bestehen zusätzliche Wechselwirkungen. Damit sind die dargestellten Zusammenhänge als iterativer Prozess zu verstehen, der sich mit zunehmendem Fortschritt z. B. der Standorterkundung, des Modellierungsprozesses, etc., sich zunehmend detaillierter ausprägt.

Die beiden Teilaufgaben der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse sind eigentlich Bestandteile der Konsequenzenanalysen, sind aber als zentrale Bestandteile mit eigener Aussagequalität beim Nachweis gesondert aufgeführt.

3.2 Konzeptuelle Modelle

Im ersten Schritt ist ein konzeptuelles Modell des Endlagers zu erarbeiten. Wichtige Eingangsgrößen des konzeptuellen Modells sind

- das vorgesehene Endlagerkonzept (Art und Menge der Abfälle, Einlagerungskonzept, Verfüll- und Verschlusskonzept, etc.),
- der einschlusswirksame Gebirgsbereich (Definition, räumliche Abgrenzung, Ein-schlusseigenschaften, geologische Langzeitprognose),
- eine Reihe von Detailuntersuchungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, des Wirtsgesteins und des Deckgebirges (Geologie und Geophysik, Eigenschaften, Hydrologie, Biosphäre, etc.), und
- die Szenarien der künftigen Entwicklung des Endlagers.

3.2.1 Räumlicher Aufbau eines konzeptuellen Modells

Der räumliche Aufbau wird in einem konzeptuellen Modell vereinfacht dargestellt, es erfolgt eine Reduzierung komplexerer Verhältnisse. Es enthält nur die wesentlichen Strukturelemente, die zur Beschreibung des Systems erforderlich sind. Bei der Auswahl nicht abgebildeter Details ist darauf zu achten, dass nur solche Strukturelemente und Informationen entfallen können, die entweder keinen Einfluss auf das Gesamtgeschehen haben oder durch andere Bestandteile oder Eigenschaften abgedeckt sind.

Abb. 3 zeigt als Beispiel den konzeptuellen Modellaufbau für die Endlagerung in Opalinuston mit den potentiellen Ausbreitungspfaden für mobile radioaktive Stoffbestandteile, zusammen mit Angaben zu den Längen der jeweiligen Transportpfade. Die geologischen Schichtungen sind schematisiert und auf die für die Ausbreitung relevanten Strukturen reduziert. Es handelt sich um das Szenario „erwartete Entwicklung“ bzw. das Referenzszenario dieser Langzeitsicherheitsanalyse. Das dargestellte Beispiel ist mit dem Szenario der Ausbreitung von Stoffen in einer ungestörten Situation verknüpft. Die Ausbreitungswege und -richtungen von Schadstoffen sind mit roten Pfeilen symbolisiert, die Fließrichtungen von Grundwässern mit blauen Pfeilen.

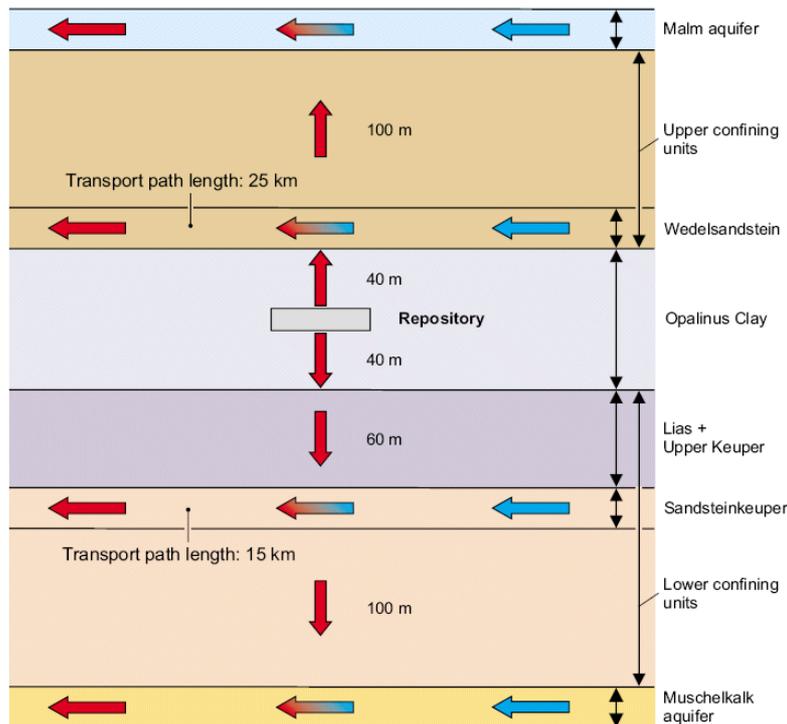


Abb. 3: Konzeptuelles Modell der räumlichen und geologischen Verhältnisse bei der Ausbreitung von radioaktiven Stoffen im Opalinuston, aus /NAG 02c/

Andere Szenarien, wie z. B. die Ausbreitung über eine vorhandene oder reaktivierte Störung, würden in modifizierten konzeptuellen Modellen abgebildet, in dem die für dieses Szenario wichtigen Strukturelemente, Abstände, Fließrichtungen, etc. in ähnlicher Weise dargestellt sind.

In der Abb. 3 ist der weitere Pfad bis zur Biosphäre nicht dargestellt, da dieser Teil des Modells für das abgebildete Szenario nicht spezifisch ist. Für die im dargestellten konzeptuellen Modell enthaltenen vier Ausbreitungspfade in durchlässigeren Gesteinsbereichen (Malm, Wedelsandstein, Sandsteinkeuper, Muschelkalk) ist nicht per se erkennbar, welche Pfade in welchem Maß zu Expositionen in der Biosphäre (Dosis) beitragen. Stellt sich heraus, dass ein einzelner oder zwei Pfade bei weitem dominieren, lässt sich dieses konzeptuelle Modell durch Weglassen anderer Pfade noch weiter vereinfachen, ohne dass damit ein Aussageverlust verbunden wäre.

3.2.2 Szenario im konzeptuellen Modell

Die Szenarien ergeben sich aus der Auswertung von FEPs und aus der Analyse der Standortverhältnisse.

Unter FEPs ist ein Katalog von Eigenschaften („Features“), Ereignissen („Events“) und Entwicklungen („Processes“) zu verstehen, in dem alle ein Endlagersystem potentiell beeinflussenden Aspekte aufgelistet sind /NAG 02b/. Die Katalog-Auflistung /NEA 99, NEA 00, NEA 05/ erfolgt dabei zunächst unabhängig von der Frage, ob der betreffende Aspekt an einem konkreten Standort oder in einem bestimmten Wirtsgestein möglich ist, und sie erfolgt auch ohne eine Bewertung der Relevanz. Bei der Erarbeitung der Szenarien für einen konkreten Standort ist daher zunächst der gesamte Katalog heranzuziehen und alle Einträge sind auf Basis der vorliegenden Standortdaten daraufhin zu bewerten, ob und welche Rolle der Aspekt im vorliegenden Fall spielt. Die Spanne der Einzelbewertungen dieser Aspekte kann von „hochsignifikant“ über „sehr wahrscheinlich“ über „nicht völlig ausschließbar“ bis hin zu „unmöglich“ reichen. Auf diese Weise werden in einem Top-Down-Ansatz diejenigen Aspekte des FEP-Katalogs ausgewählt, die im vorliegenden Fall bei der Modellierung zu berücksichtigen sind.

Ergänzend zu den generischen FEPs ist als eine weitere Quelle die standortspezifische Betrachtung zu erarbeiten. Einerseits betrifft dies FEPs, die spezifisch für das Wirtsgestein (z.B. für Salz oder Ton) sind und als solche nicht in der generischen Liste enthalten sind, z. B. für Ton /NEA 03b/. Die Standortdaten sind ferner daraufhin zu untersuchen, ob sich über die generische und die wirtsgesteinspezifische FEP-Liste hinaus standortspezifische FEPs ergeben, die aus Eigenheiten des Standorts resultieren und nur an diesem Standort eine Rolle spielen.

Aus der Auswertung der FEPs für das konkrete Endlagervorhaben sind dann die Szenarien zu entwickeln. Szenarien sind ausgewählte Ablauffolgen, die entweder den zu erwartenden Ablauf der künftigen Entwicklung des Endlagers („Standard- oder Referenzszenario“) und wahrscheinlicher Varianten („Variantenszenarien“) dieser Entwicklung wiedergeben oder die nicht auszuschließende Ereignisse (Störfälle) und die daraus resultierenden Abfolgen beschreiben („Störfallszenarien“). Zur Überprüfung der Robustheit des Endlagersystems können auch unwahrscheinliche Szenarien definiert werden, aus denen die Eigenschaften des Endlagersystems bei einem unterstellten Versagen bestimmter Barrieren abgeschätzt werden können. Es handelt sich um:

- „Hypothetische Szenarien“, für deren Eintreten sich keine Wahrscheinlichkeit angeben lässt, denen aber eine gewisse Plausibilität nicht völlig abgesprochen werden kann,
- „Extremszenarien“ mit äußerst rigiden Annahmen, um maximale Auswirkungen zu simulieren und zu prüfen,

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

- „What-If-Cases“ mit angenommenen Ausfällen, die zwar durch Erkundung, Beobachtung, Messung etc. ausgeschlossen werden können, bei denen aber ein „Übersehen“ unterstellt wird.

Solche Szenarien sind im Unterschied zu Standard- und Störfallszenarien nicht für den Nachweis im Regelfall relevant, können aber Auskunft über den Grad der Abdeckung der Anforderungen unter äußerst ungünstigen Umständen und über die Robustheit der Sicherheitsaussage geben. Dies kann zusätzliches Vertrauen in das System begründen.

In der Szenarientwicklung sind drei Einflussmöglichkeiten auf das Endlagersystem zu berücksichtigen /HER 98/:

- Natürliche Einflüsse auf Geologie, Hydrogeologie, Geochemie, Umwelt, Neotektonik, Seismizität, Vulkanismus, Diapirismus, Erosion, Denudation, Subrosion, Grundwasser- und Meeresspiegeländerungen,
- Einfluss des Endlagers und der Abfälle auf Geologie, Hydrogeologie, Geochemie, Umwelt, Lagerstätten durch Hohlräumstellung, Verfüllung, Gas- und Wärmeentwicklung, chemische Reaktionen und Strahlung,
- Unbeabsichtigte menschliche Einwirkungen wie z.B. durch Bohrungen, Kavernen, Bergwerke sowie gegebenenfalls die beabsichtigte Rückholung der Abfälle. Die Ergebnisse dieser Einflussmöglichkeit werden aber in der Bewertung separat gehandhabt.

Aus dem Screening dieser Einwirkungen und Einflüsse, in Kombination mit den generischen und wirtsgesteinsspezifischen FEPs, resultieren eine Vielzahl verschiedenster Szenarien. In einem weiteren Schritt zu den konzeptuellen Modellen werden diejenigen Szenarien zusammengefasst, die von den auslösenden Ereignissen und Bedingungen, von der erwarteten Häufigkeit/Wahrscheinlichkeit, von den Abläufen und erwarteten Auswirkungen her in vergleichbare Szenariengruppen passen. Einander sehr ähnliche Szenarien können zu einem repräsentativen Szenario zusammengefasst werden.

Ergebnis der Gesamtheit konzeptueller Modelle ist eine ausführliche Beschreibung

- des gesamten Endlagersystems,
- des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ,

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

- gegebenenfalls. weiterer geologischer Bereiche mit Rückhaltungswirkung,
- der wahrscheinlichen künftigen Entwicklung des Systems
- eine Auflistung und Begründung der Szenarien, die bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit zu berücksichtigen sind.

Ausgehend von Labor- und In-Situ-Untersuchungen, Tests und Beobachtungen werden geologische, hydrologische, geotechnische, physikalische und chemische Modelle aufgestellt.

Das konzeptuelle Modell ist mit mindestens zwei unterschiedlichen Arten von Unsicherheiten behaftet /NAG 02a/:

- Szenarien-Unsicherheit: Das Referenzkonzept macht im Standard-Szenario Aussagen über die wahrscheinlichste Entwicklung, die das Endlagersystem künftig nehmen wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich nicht um eine Vorhersage im engen Sinn handelt und dass das Eintreffen oder Ausbleiben bestimmter Ereignisse und Entwicklungen grundsätzlich unsicher bleiben wird. Das konzeptuelle Modell muss aus Sicherheitsgründen so definiert sein, dass es diese Unsicherheiten abdeckt, aber nicht durch Addition vieler, einander womöglich noch gegenseitig widersprechender Szenarien unrealistische Extremverhältnisse abbildet.
- Modell-Unsicherheit: Eine zweite Unsicherheitskategorie ist die Frage, ob das gewählte Konzeptualmodell den Ablauf des Szenarios angemessen repräsentiert, einschließlich der Frage, ob nicht ebenso plausible Alternativmodelle das Szenario besser abbilden würden.

Beiden Unsicherheitskategorien ist im Rahmen der Konzeptualisierung nachzugehen, sie sind durch entsprechend sorgfältige Untersuchung auf ihren Einfluss hin zu charakterisieren. Entsprechend der zentralen Bedeutung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für den Einschluss sind Unsicherheiten, die sich auf diesen Bereich beziehen, als gravierender zu bewerten als Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Deckgebirge oder der Biosphäre, da sie überproportional in die Freisetzungseigenschaften des Gesamtsystems eingehen können. Dies betrifft beide Arten von Unsicherheiten.

Szenarien-Unsicherheiten beim einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind kritisch, weil sie die Integrität dieses Gebirgsbereichs betreffen. Unsicherheiten über dessen Integrität im Einschlusszeitraum müssen so vollständig wie mit wissenschaftlichen Methoden möglich ausgeschlossen werden können. Dies stellt höchste Ansprüche an die Prognosefähigkeit dieses ausgewählten räumlichen Bereichs. Modell-Unsicherheiten betreffen die Einbettung und Auswahl des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, ihr Einfluss lässt sich mittels Standorterkundungs-Methoden verringern. Bei beiden Unsicherheitstypen ist eine vergleichsweise geringe räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs hilfreich, da der erforderliche Aufwand zur Erreichung einer aussagefähigen Nachweisaussage begrenzt ist.

3.3 Numerische Modelle

Für die Untersuchungen von Radionuklidbewegungen von den im Endlager eingelagerten Abfällen bis in die Biosphäre werden abstrahierende Simulationsmodelle mit den entscheidenden Prozessdaten und Ergebnissen verwendet. Um die Rechentechnik zu vereinfachen, werden soweit möglich die verschiedenen Kompartimente des Endlagersystems rechentechnisch getrennt modelliert und mittels definierter Schnittstellen geeignet zusammengefügt. Solche Kompartimente sind z.B.

- das Nahfeld mit den Abfallbehältern und dem Buffer,
- der einschlusswirksame Gebirgsbereich im Nahfeld mit Schächten und Strecken sowie der zugehörigen Schacht- und Streckenverschlüsse einschließlich der Auflockerungsbereiche,
- die Ausbreitung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich,
- die Verdünnung und Verteilung in Aquiferen des Deckgebirges und der oberflächennahen wasserführenden Schichten, und
- die Nutzung dieser Aquifere und die dadurch verursachte Strahlenexposition.

Abstrahierende Simulationsmodelle dienen dazu, die Komplexität der natürlichen Vorgänge auf die wesentlichen Vorgänge eines Ablaufes hin zu vereinfachen und eine quantitative Analyse zu ermöglichen, ohne dass diese Vereinfachungen zu falschen Schlüssen führen. Wesentlich ist dazu, dass die Abstraktionen durch Vergleich mit Untersuchungen und Beobachtungen verifiziert werden, d.h. dass die Ergebnisse von Simulationen möglichst weitgehend in Übereinstimmung mit vorliegenden Erkenntnissen

gebracht werden können. Das entsprechende Teilmodell kann dann als verifiziert gelten und ist für den betreffenden Zweck einsetzbar.

Für die rechentechnische Umsetzung wird eine Vielzahl an Parametern benötigt. Diese basieren auf Daten, die bei Standortuntersuchungen, in Laboranalysen und als begründete Schätzwerte gewonnen wurden. Alle verwendeten Parameter weisen daher in einem gewissen Umfang Unsicherheiten auf. Die Natur dieser Parameter-Unsicherheiten kann vielfältigen Ursprungs sein:

- In Laborexperimenten lassen sich Stoffe und Randbedingungen recht genau festlegen und kontrollieren, die Unsicherheit erstreckt sich daher im Wesentlichen auf die verwendete Messtechnik und deren Genauigkeit.
- Geologische Systeme weisen in gewissem Umfang immer Inhomogenitäten auf. Die Ergebnisse von Standortuntersuchungen müssen also die real angebotenen Verhältnisse vereinfachen, damit das Modell handhabbar ist (z.B. Aussagen zur Durchlässigkeit eines Gesteins). Des Weiteren können die Methoden der Standorterkundung nur eine bestimmte begrenzte Messqualität erreichen (z.B. bei Packertest in sehr gering durchlässigem Gestein). Viele Größen lassen sich daher nur in gewissen Bandbreiten angeben, weil eine exakte Abbildung der realen Verhältnisse nicht möglich ist. In der Regel ist daher eine repräsentative Auswahl zu treffen, welche Daten mit welcher Gewichtung bei der Bildung von Mittelwerten berücksichtigt werden und welche Daten mit welcher Begründung keine Berücksichtigung finden.
- Eine ganze Reihe von Angaben, die für die Quantifizierung von Szenarien notwendig sind, ist einer direkten Beobachtung oder Messung nicht zugänglich. Hier muss z.B. aus einem relativ kurzen beobachteten Zeitraum auf die Veränderungen nach langen Zeiträumen (z.B. bei der Hochrechnung von Korrosionsangaben) oder aus einer begrenzten Anzahl von Messungen und Beobachtungen auf eine Makrogröße geschlossen werden (z.B. aus einer begrenzten Anzahl von Bohrungen und Messungen der Durchlässigkeit auf eine Struktur und eine effektive Durchlässigkeit eines Wirtsgesteinsbereichs). Es ist deswegen wichtig, die zur Verfügung stehenden Erkenntnisse mit einem möglichst gut entwickelten Verständnis der Mechanismen und Zusammenhänge zu kombinieren. Trotzdem bleiben diese Größen mit einer komplexeren Unsicherheit behaftet, die sich auch in einer größeren Bandbreite ausdrückt.

Mit den Daten, die in die rechentechnische Umsetzung eingehen, ist daher eine sorgfältige Einschätzung der damit einhergehenden Unsicherheiten zu erarbeiten. Der Einfluss dieser Unsicherheiten auf das Endergebnis wird später als Parametervariation bei den Konsequenzenanalysen untersucht (siehe unten).

Die rechentechnische Umsetzung in numerischen Modellen steht mit dem konzeptuellen Modell in einem engen Zusammenhang. Die rechentechnische Umsetzung hat sich dabei der konzeptuellen Modellierung unterzuordnen, rechentechnische Einschränkungen dürfen nur dann die konzeptuelle Modellierung beeinflussen, wenn Art, Umfang und Konsequenzen dieser Einschränkungen verstanden sind und sicherheitstechnisch nicht zu einer Unterschätzung der Auswirkungen führen. Diese Priorität des konzeptuellen Modells soll an zwei Beispielen beschrieben werden:

- Ist im konzeptuellen Modell z.B. eine Ausbreitung hochsalinärer Wässer im tiefen Untergrund relevant, dann muss das rechentechnische Modell auch entsprechend für diese Aufgabe geeignet sein. Die resultierenden Dichte-, Druck- und Konzentrationsunterschiede im Vergleich zur rechentechnischen Umsetzung mit gering mineralisierten Wässern, veränderte Fließrichtungen oder die Unterschiede beim Sorptionsverhalten von Radionukliden können zu einer erheblichen Fehleinschätzung der Auswirkungen führen. Eine solche eingeschränkte Eignung des Rechenmodells ist daher sorgfältig zu untersuchen und entweder zu beseitigen oder in sicherheitsgerichteter Weise zu ersetzen.
- Um die Rechentechnik zu vereinfachen, werden im Rechenmodell vielfach vereinfachende Annahmen getroffen, beispielsweise zur Reduzierung der hochkomplexen Kluftgeometrie (bei Granit) oder zum Löslichkeits-, Mobilitäts- und Sorptionsverhalten von Radionukliden. Diese Vereinfachungen sind zulässig, sofern sie sich in Richtung auf eine höhere Sicherheit auswirken. So kann z.B. auf eine rechentechnisch aufwändige Integration chemischer Gleichgewichte in das Rechenmodell verzichtet werden, wenn für entsprechend sensitive Parameter die sicherheitsgerichteten Extremwerte eingesetzt werden (z.B. unendliche Löslichkeiten, keine Sorption, etc.). Das Rechenmodell ist dadurch vereinfacht, liefert dann aber Extremwerte.

Beim Vergleich von Langzeitsicherheitsanalysen - beispielsweise beim Benchmarking, beim Vergleich von Standorten, beim Vergleich jüngerer mit älteren Analysen – sind solche Unterschiede in der rechentechnischen Umsetzung entsprechend sorgfältig zu

bewerten, da sie sich in quantitativer Hinsicht über mehrere Größenordnungen auswirken können.

3.4 Konsequenzenanalysen

Erreichen Radionuklide die belebte Umwelt, dann können Expositionen resultieren. Konsequenzenanalysen ermitteln den quantitativen Umfang solcher Expositionen.

Mit Hilfe der Kombination der Rechenmodelle der einzelnen Kompartimente und deren Standardlauf mit den wahrscheinlichsten Szenarien und Parametern wird eine Strahlenexposition über die Zeit für die am höchsten belastete Gruppe errechnet. Typischerweise tritt eine Strahlenexposition erst nach einem sehr langen Zeitraum auf, z.B. erst nach einigen 10.000 Jahren oder nach einer Million Jahre. Die Exposition und deren Maximum liegen aufgrund der Verzögerung durch die Barrieren des Endlagers, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, idealerweise weit in der Zukunft und unterschreitet den maximal zulässigen Wert für heute akzeptierte Strahlenexpositionen um viele Größenordnungen. Ist dies der Fall, ist der Nachweis der Langzeitsicherheit für den Referenzfall im Prinzip quantitativ geführt.

Neben dem Referenzfall sind aber auch Parametervariationen sinnvoll. Aus dem Durchrechnen von Parametervariationen wird deutlich, wie groß der Einfluss eines Parameters und die Unsicherheit bei seiner Bestimmung oder seiner Auswahl aus einem gegebenen Wertebereich auf das Endergebnis ist. Sinnvollerweise werden die Parameter, wie beispielsweise hydraulische Durchlässigkeiten, über Wertebereiche hinweg variiert, wie sie am betreffenden Standort beobachtet worden sind und daher tatsächlich vorkommen (Unsicherheitsbandbreite des Parameters). Gegebenenfalls können auch noch die Verhältnisse an anderen Standorten herangezogen werden. Parametervariationen in Berechnungen zur Langzeitsicherheit erlauben vor allem eine begründete Einschätzung über die Relevanz der einzelnen Parameter. Sie ermöglichen damit umgekehrt, die Genauigkeitsanforderungen bei der Bestimmung der Parameter auf diejenigen Größen zu konzentrieren, deren Einfluss resultatsbezogen am größten ist.

Im Extremfall können bei der Definition von Szenarien und bei der Parametervariation aber auch entsprechend unwahrscheinliche Szenarien bzw. Werte herangezogen werden, um z.B. nichtlineare Zusammenhänge zwischen dem jeweiligen Parameter und dem Endergebnis aufzudecken oder um zu überprüfen, ob entsprechende unwahr-

scheinliche Fälle relevant sind und von dem Zusammenwirken der Rückhaltesysteme des Endlagers noch abgedeckt sind.

Als Illustration dieses Schrittes seien die entsprechenden Szenarien benannt, die beim Entsorgungsnachweis Opalinuston der NAGRA untersucht wurden. Neben den beiden realistischen Referenzszenarien „Ausbreitung auf dem Wasserpfad“ und, für das Nuklid C-14, „Ausbreitung auf dem Gaspfad“ wurden als „What-if“-Cases die Auswirkungen unter folgenden unrealistischen Bedingungen untersucht /NAG 02c/:

- Verhundertfachung der Durchflussrate im Opalinuston,
- Transport der Radionuklide entlang hydraulisch durchlässiger Diskontinuitäten,
- Beschleunigte Auflösung der Kernbrennstoffmatrix,
- Durchgehende Redoxfront (oxidierende Verhältnisse) bis in den Endlagernahbereich,
- Erhöhte Durchlässigkeit des Rampen- und Schachtbereichs für den Gaspfad,
- Freisetzung des gasförmigen C-14 ohne Rückhaltung durch den Opalinuston,
- Kombination aus frühem Behälterversagen, geringer Rückhaltung im Nahfeld und im Opalinuston und erhöhter Durchlässigkeit,
- Kein Durchfluss in der Geosphäre, ausschließlich Ausbreitung durch Diffusion,
- 10-fach erhöhte Korrosionsrate der Brennelementhüllen,
- Sorption für Iod im Nah- und Fernfeld auf Null gesetzt,
- Von 40 auf 30 m verringerte Transportdistanz im Opalinuston.

Die Ergebnisse dieser „What-If“-Cases werden herangezogen, um die Robustheit des Endlagersystems aufzuzeigen. Variationen dieser Art sind als Stand von Wissenschaft und Technik bei allen Langzeitsicherheitsanalysen anzusehen und sind daher auch Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises.

3.5 Methodik und Instrumente

Die konzeptuellen Modelle der Langzeitsicherheit eines Endlagers stellen zunächst eine qualitative Beschreibung der Abläufe dar. Damit aus dieser qualitativen Beschrei-

bung quantitative Angaben gewonnen werden können, sind Rechenmodelle erforderlich. In diesem Kapitel werden die dafür notwendigen Methoden und die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik heute verfügbaren Instrumente vorgestellt und ihre Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit an ausgewählten Beispielen illustriert.

Da die Umsetzung aller Teilvorgänge eines Ablaufes in ein Gesamtmodell die Kombination vieler verschiedener Teilvorgänge erfordert, wird in Kapitel 3.5.1 zunächst in verschiedene Raumbereiche unterteilt. Im Anschluss sind die Raumbereiche Nahfeld (Kapitel 3.5.2), einschlusswirksamer Gebirgsbereich (Kapitel 3.5.3), Fernfeld (Kapitel 3.5.4) und Biosphäre (Kapitel 3.5.5) näher betrachtet und detaillierter aufgegliedert. Da im Nahfeld die Modelle je nach Ablauf (Szenarien) variiert werden, ist in diesem Kapitel (Kapitel 3.5.2) die Umsetzung eines Szenarios in ein Modell näher beschrieben. Beim Fernfeld spielen verschiedene Herangehensweisen an die Modellierung eine Rolle, daher ist in diesem Kapitel (Kapitel 3.5.4) die Umsetzung in verschiedene numerische Modelle, deren Stärken und Schwächen sowie der Vergleich untereinander näher beschrieben. Im Kapitel zur Biosphärenmodellierung (Kapitel 3.5.5) wird anhand der Expositionspfade gezeigt, wie komplexe Zusammenhänge in numerischer Hinsicht vereinfacht werden können und in ein Gesamtmodell eingehen.

3.5.1 Aufteilung in Raumbereiche

Die Modellierung der Langzeitsicherheit eines Endlagers muss in einem zeitlichen Verlauf (i. d. R. über eine Million Jahre bzw. bis zum Erreichen der Peak-Dosis) verschiedene Vorgänge (z. B. Korrosion von Behältern, Auflösung von Stoffen, Transport von Stoffen in Grundwasser, in verschiedenen Raumbereichen (im Lagerbereich der Behälter, innerhalb und außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, in Oberflächengewässern) in einem Modell abbilden. Die einzelnen Vorgänge verlaufen dabei nach jeweils eigenen spezifischen Gesetzmäßigkeiten, die Integration der gesamten Vorgänge in ein einziges Gesamtmodell und die Umsetzung in ein alles integrierendes Rechenmodell würde eine hohe Komplexität notwendig machen, das Modell wäre relativ starr und unflexibel:

- jede geringfügig geänderte Variante erfordert ein jeweils eigenes Rechenmodell,

- jeder Rechenlauf erfordert den Einsatz des gesamten Berechnungsablaufs, ein Simulieren der einzelnen Teilvorgänge ist mit enormem überflüssigem Rechenaufwand verbunden, und
- ein sorgfältiges Überprüfen der einzelnen Komponenten des Modells ist erschwert oder gar nicht möglich.

Es ist daher sowohl vom praktischen Gesichtspunkt her als auch aus Qualitätsüberlegungen sinnvoll, die Modellierung in Teilmodelle aufzugliedern. Eine Aufteilung der Modellierung nach den raumbezogenen Bereichen skizziert Abb. 4.

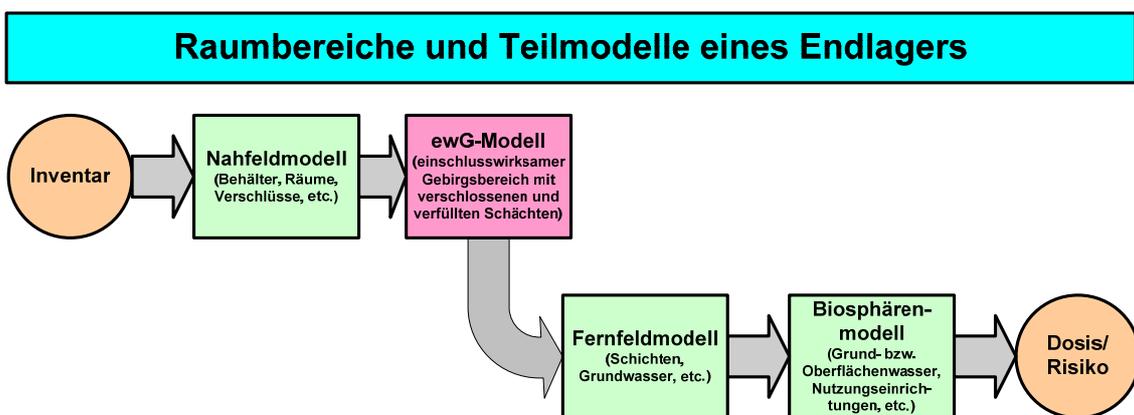


Abb. 4: Auflösung der Teilmodelle nach Raumbereichen mit ihren Komponenten

Die in Abb. 4 dargestellten Teilmodelle sind getrennte Module und liefern jeweils ihr eigenes Ergebnis. Die Teilergebnisse der einzelnen Bereiche werden berechnet und über definierte Schnittstellen dem nachfolgenden Modellbereich als Eingangsgrößen zugeführt.

Dieser modulare Aufbau hat den Vorteil, dass bei geeigneter Definition der Schnittstellen Module austauschbar gestaltet werden können. Es dient der Zuverlässigkeit und dem Vertrauen, wenn Module mit gleicher Aufgabenstellung, aber mit unterschiedlicher rechentechnischer Umsetzung zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Test, Qualifizierung durch Vergleichstests, Validierung anhand definierter Eingangsbedingungen sowie eine separate Anwendung der Module ist bei diesem Vorgehen möglich.

3.5.2 Teilmodelle für das Nahfeld

Die Aufteilung in die drei Teilmodelle kann noch weiter verfeinert werden, da jedes Teilmodell mehrere Komponenten, Vorgänge und Teilaufgaben umfasst. Während die drei Teilmodelle unabhängig von Wirtsgesteinen und Standorten definiert sind, ist die weitergehende Aufteilung oft wirtsgestein-, standort- und konzeptspezifisch sowie teilweise auch szenarienspezifisch. Abb. 5 zeigt die weitere Aufteilung des Nahfeldes bei der Modellierung eines Wassereintruchs in einem Endlager im Steinsalz. Da die Diffusion im Steinsalz vernachlässigbar klein ist, ist dieser Übergang in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich nur angedeutet.

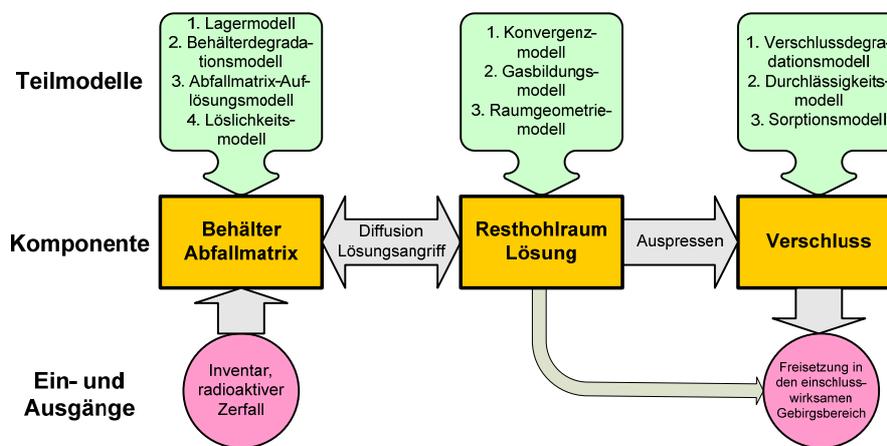


Abb. 5: Nahfeldmodelle und Komponenten beim Szenario Wassereintruch im Steinsalz

Die drei Komponenten und die nötigen zehn Teilmodelle zur Modellierung aller wesentlichen Abläufe im Nahfeld sind vollständig aufgeführt. Für die zehn Modelle kommen sowohl sehr vereinfachte oder auch komplexere Ausführungen in Frage. Ein sehr vereinfachtes Teilmodell wird dann gewählt, wenn das jeweilige Modell für das Endergebnis keine Rolle spielt (z. B. wenn die Behälterdegradation oder die Auflösung der Abfallmatrix lediglich eine kurzzeitige Verzögerung ohne wesentlichen Rückhalteeffekt verursacht) oder wenn bei einer konservativen Betrachtung von einzelnen unsicheren Effekten kein Kredit genommen werden soll (z. B. Vernachlässigung von Sorption an Materialien des Verschlussbauwerkes). Für alle Teilmodelle sollte aber ein definierter und beschreibbarer Zustand vorhanden sein, auch wenn dieser sehr einfach gestaltet sein kann.

Die Ergebnisse einer Nahfeldmodellierung lassen sich anschaulich darstellen. Als Beispiel sind die Bilanzen der aus verschiedenen Nahfeldbereichen in den einschlusswirk-

samen Gebirgsbereich (Tonsteinschicht Callavo-Oxfordien, COX) übergehenden I-129-Inventaren für ein Endlager in Frankreich in Abb. 6 wiedergegeben. Es handelt sich um das Referenzszenario für die Endlagerung abgebrannter Brennelemente. Abgebildet sind im unteren Teil des Bilds die Übergänge des Inventars aus den Behältern („Colis“) direkt aus deren Einlagerungsort („Alveole“) in den Tonstein (41%), über die Einlagerungstrecken („Zone de Stockage“) in den Tonstein (59%), über die Zugangsstrecken zum Endlager in den Tonstein ($\approx 0,008\%$) sowie über die Verschlüsse der Schächte über die Tonsteinschicht hinweg ($3 \cdot 10^{-5}\%$).

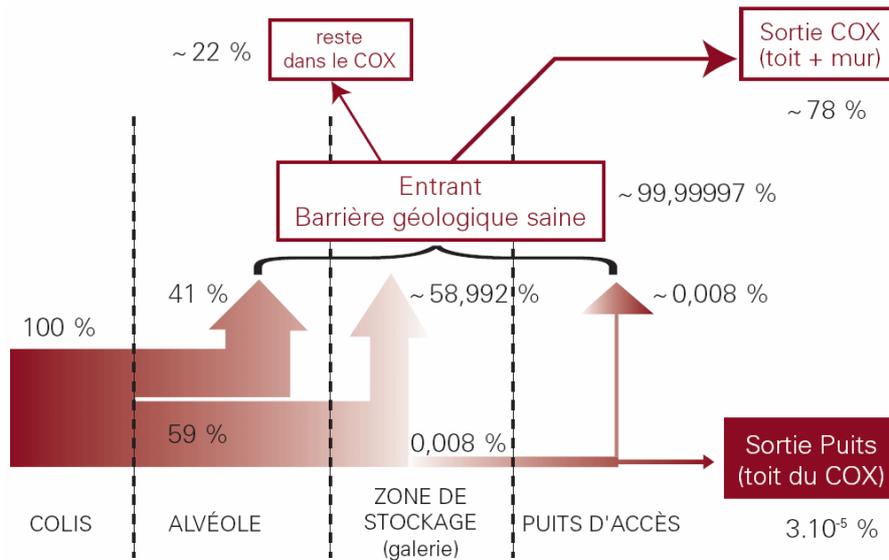


Abb. 6: Bilanz des Übergangs vom Nahfeld in die geologische Barriere am Beispiel eines Endlagers in Tonstein, aus /AND 05a/

Das Bild zeigt, dass im Verlauf von einer Million Jahren der weit überwiegende Teil in die geologische Barriere („Barrière géologique saine“) übergeht, im Einlagerungsbe-
reich und in den Feldern des Endlagers verbleibt praktisch kein Anteil. In der geologi-
schen Barriere verbleiben langfristig ca. 22% („reste dans le COX“), ca. 78% verlassen
die Barriere wieder („Sortie COX“) nach oben und nach der Seite („toit + mur“). Die hier
bilanzierten Verhältnisse bilden nur Iod-129 ab und lassen sich allenfalls auf Se-79 und
Cl-36 übertragen. Für andere, weniger mobile Nuklide, ergeben sich je nach Mobilität
völlig andere Verhältnisse.

Mit dem Nahfeldmodell für das Szenario lassen sich alle wesentlichen Vorgänge simu-
lieren. Soweit sich zwischen den einzelnen Teilmodellen keine Wechselwirkungen er-
geben, können diese auch einzeln entworfen und getestet werden (Prozessmodellie-
rung). Die Integration eines Prozesses in ein Gesamtmodell (integriertes Modell) ist
nicht immer vorteilhaft, da der rechentechnische Aufwand beim Gesamtmodell erhöht

wird. Insbesondere dann, wenn keine Einflüsse aus anderen Teilmodellen zu berücksichtigen sind und der jeweilige Prozess (z. B. die Gasbildung oder die Konvergenz von Hohlräumen) eigenständig abläuft, bietet es sich an, diesen Prozess gesondert zu modellieren und nur die Ergebnisse des Teilmodells in das Gesamtmodell zu integrieren. Die Modularisierung dieser Teilmodelle hat auch den Vorteil, dass Varianten von Szenarien, bei denen auf der Ebene eines einzelnen Prozesses variiert wird (z. B. nur die Auswirkungen verschiedener Konvergenzraten auf das Hohlraumvolumen getestet werden soll), einfacher und mit rechentechnisch geringerem Aufwand durchgespielt werden können.

Bei anderen Wirtsgesteinen (z. B. Tonstein statt Steinsalz), anderen Behälterkonzepten (z. B. bei Behältern mit definierter und nachgewiesener Standzeit), geändertem Aufbau des Nahfelds (mit definiertem Einbau der Behälter in eine Abfolge an Buffermaterialien), bei anderen Fließverhältnissen im Nahfeld (kein durch Konvergenz angetriebener Durchfluss, Diffusion ohne Vorzugsrichtung, andere Durchlässigkeiten, etc.) und bei anderen Szenarien ist der gesamte Modellaufbau, ist das Zusammenspiel der einzelnen Teilmodelle und sind die Triebkräfte und zeitlichen Abläufe völlig anders. Entsprechend ist das Nahfeldmodell und sind die ausgewählten Teilmodelle an die Verhältnisse anzupassen. Das Nahfeld und seine Abbildung in Teilmodellen ist daher für jedes Wirtsgestein und jedes Endlagerprojekt spezifisch. Selbst bei ähnlichen Behälterkonzepten und in ähnlichen Wirtsgesteinen finden sich daher fachlich begründete Unterschiede in der Modellierung des Nahfelds, so dass einem direkten Vergleich verschiedener Projekte praktische Grenzen gesetzt sind. Es macht daher z. B. wenig Sinn, bei Standortvergleichen nach unterschiedlichen Methoden ermittelte Kenngrößen für das Nahfeld nebeneinander zu legen und daraus z. B. Rangfolgen herzuleiten.

3.5.3 Modellierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Sofern der einschlusswirksame Gebirgsbereich kein nennenswertes Eindringen von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen zulässt, kann auf eine Modellierung verzichtet werden (Steinsalz bei vollständigem Einschluss). Sofern Schächte und Verschlüsse vorliegen und der Konvergenzvorgang noch nicht abgeschlossen ist, können diese für die Analysen in What-If-Szenarien (z. B. frühe Lösungseinbrüche, frühes Schachtversagen) gesondert modelliert werden, eine Modellierung des gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist dafür nicht erforderlich.

Ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Ton oder Tonstein aufgebaut, dann ist dieser für mobile Radionuklide in langen Zeiträumen (> 100.000 a) durchdringbar. Im Referenzfall ist das Modell bei einer homogen aufgebauten Tonschicht sehr einfach aufgebaut. Ein detailliert aufgebautes Modell, das die notwendige Qualität für einen Nachweis aufweist, wird den räumlichen Aufbau des einschlusswirksamen Bereichs eingehend differenzieren und, den Erkundungen gemäß, auch differenzierte Parameter zuweisen.

Wichtigster Mechanismus, der im Modell zu berücksichtigen ist, ist die Diffusion. Ein wichtiges Kennzeichen für die diffusive Ausbreitung ist, dass Tonschichten aufgrund ihres Schichtaufbaus in horizontaler und in vertikaler Richtung unterschiedliche Diffusionsgeschwindigkeiten aufweisen. Diese Eigenschaft wird als Anisotropie bezeichnet und bildet sich in einer rascheren Diffusion in horizontaler Richtung aus. Abb. 7 verdeutlicht diesen Effekt und stellt die Verteilung von Selen nach 100.000, 500.000 und 1 Mio. a Diffusion in Tonstein dar. Man beachte, dass der Maßstab in vertikaler Richtung um das 1,5-fache gedehnt ist, der Vorzugseffekt in horizontaler Ausbreitungsrichtung als noch ausgeprägter ist als es in der Abbildung erscheint.

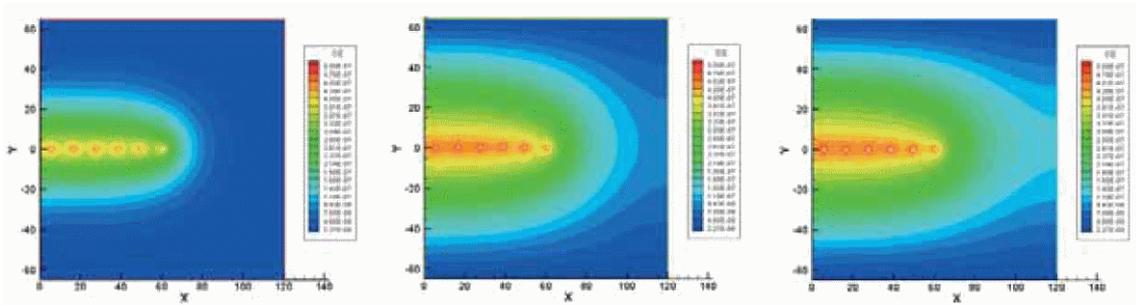


Abb. 7: Anisotropie-Effekt bei der Diffusion in Tonstein: Verteilung von Selen nach 100.000, 500.000 und 1 Mio. Jahren in Tonstein, aus /AND 05a/

Ein weiterer wichtiger Effekt innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist die Sorption. Ton und auch Tonstein verfügen bekanntlich über ausgeprägte sorbierende Eigenschaften, die bei vielen Metallen zu einer nahezu irreversiblen Rückhaltung in diesem Gebirgsbereich führen. Abb. 8 zeigt den Gesamteffekt der Rückhaltung („Atténuation totale“) in Tonstein für verschiedene langlebige Radionuklide in den unterschiedlich verpackten Abfallarten C/CU (abgebrannte Brennelemente etc.) und B (erhöht alpha-haltige schwach- und mittelradioaktive Abfälle).

Radionucléides	Atténuation de la masse à la sortie du Callavo-Oxfordien (toit + mur)	
	Déchet C / CU	Déchets B
⁹³ Mo, ¹⁰ Be, ^{93m} Nb, ⁹⁴ Nb, ⁹⁹ Tc, ¹²⁶ Sn, ^{166m} Ho	Atténuation totale (100 %)	
¹⁴ C, ¹³⁵ Cs, ¹⁰⁷ Pd, ⁵⁹ Ni, ⁹³ Zr		
⁷⁹ Se	> 99.95 %	
⁴¹ Ca	90 – 95 %	> 99 %
³⁶ Cl	65 – 75 %	> 70 %
¹²⁹ I	20 – 30 %	> 50 %

Abb. 8: Sorptions-Effekt: Rückhaltevermögen für Tonstein nach Radionukliden und Abfallarten nach 1 Mio. Jahren, aus /AND 05a/

Für die Metalle, mit Ausnahme von Calcium, ergibt sich eine vollständige Rückhaltung im Tonstein. Nur Nicht- und Halbmetalle (⁷⁹Se) sowie Calcium (⁴¹Ca) überwinden nennenswert diesen Bereich über die Ausbreitung nach oben und nach der Seite („toit+mur“).

3.5.4 Modellvarianten beim Fernfeld und Grundaufbau von Modellen

Vom geologischen Profil zum konzeptuellen Modell

Mehr noch als beim Nahfeld oder dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist die Modellierung des Fernfeldes dem jeweiligen Standort anzupassen. Die Fernfeldmodellierung weist auch bei feinsten Detailauflösungen weniger Teilmodelle auf, muss aber mindestens dem standortspezifischen geologischen Schichtenaufbau angepasst sein. Dadurch bedingt macht eine allgemeingültige Beschreibung des Modellaufbaus im Fernfeld wenig Sinn, deswegen erfolgt hier eine Beschreibung anhand eines ausgewählten Beispiels.

Beispiel für den Aufbau eines Fernfeldmodells

Der Aufbau des Fernfeldmodells wird anhand des Entsorgungsnachweises der NAGRA für den Standort Benken beschrieben. Die dortigen Verhältnisse beim Wirtsgestein (Tonstein) im Profil sind in Abb. 9 skizziert.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

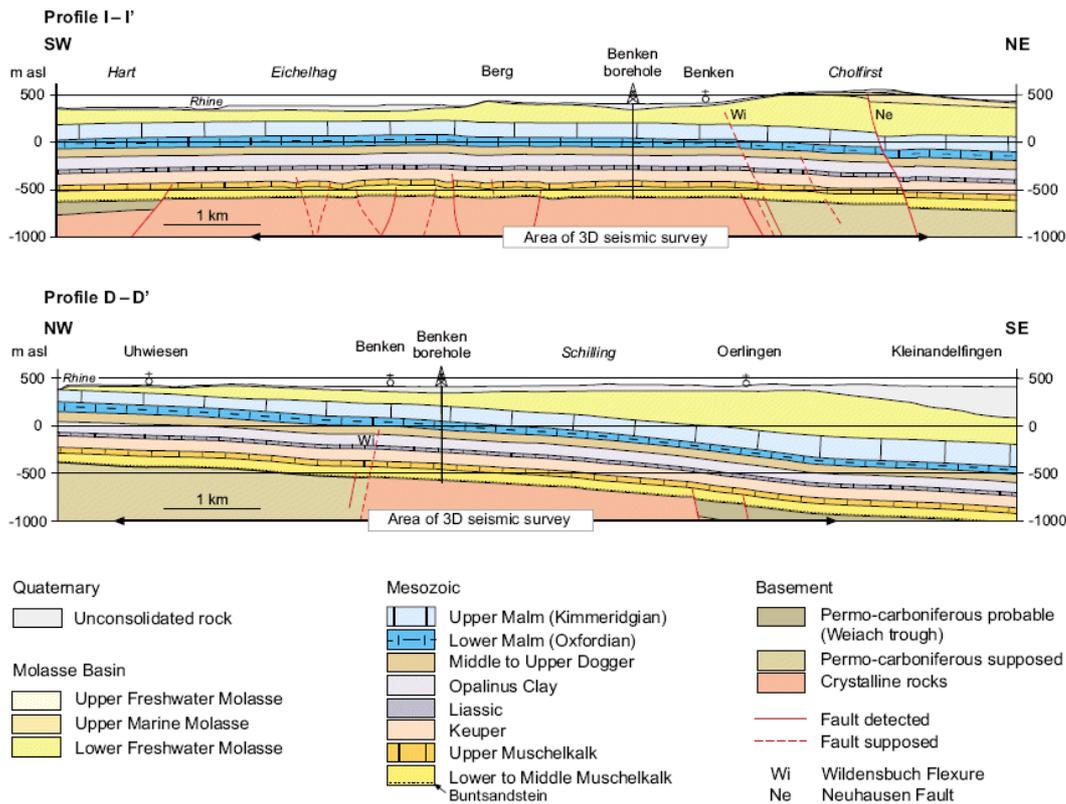


Abb. 9: Geologisches Profil am Standort Benken, aus /NAG 02d/

Durch sorgfältige Analyse der geologischen Verhältnisse wird dieser Schichtaufbau im Sinne eines konzeptuellen Modells auf die wesentlichen Ausbreitungspfade im Fernfeld eingengt. Durch eine Analyse der Verhältnisse ist sicher zu stellen, dass auch mit der Einengung alle potentiellen Ausbreitungspfade abgedeckt sind. Abweichend von der Konzeptualisierung sind neben diesem Referenzfall ohnehin noch diejenigen Ereignisse zu modellieren, die als weniger wahrscheinliche Fälle oder als unwahrscheinliche „What if ...“-Fälle zu modellieren sind, wie z. B. die Neuentstehung von Störungen. Im Ergebnis dieses Prozesses ergeben sich für den Referenzfall die in Abb. 3 (auf S. 14) skizzierten Pfade.

Man erkennt aus Abb. 3, dass vom Nahfeld ausgehend zwei wesentliche Richtungen für die Ausbreitung infrage kommen, dass aber auf dem weiteren Fließweg mehrere Richtungen zu berücksichtigen sind, von denen nicht per se und einfach vorhersagbar ist, welchen Anteil sie am gesamten Fluss haben. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lösungen und Schadstoffen sind die jeweiligen Parameter (Druckunterschiede, Diffusionskonstanten, Durchlässigkeiten) zu berücksichtigen. Außerdem sind wichtige Parameter in diesem Fließgeschehen zeitlichen Veränderungen unterworfen, wie z. B.

der radioaktive Zerfall auf dem Fließweg oder die zwischen Eis- und Warmzeiten wechselnden Druckverhältnisse.

Rechentechnische Umsetzung des Modells

Für die rechentechnische Lösung der gestellten Aufgabe lassen sich grundsätzlich drei verschiedene Herangehensweisen unterscheiden: die eindimensionale mathematisch-analytische Lösung, die zwei- oder dreidimensionale Kompartiment-Lösung und die Lösung über finite Elemente. Diese drei grundlegenden Herangehensweisen sind weit verbreitet und für viele Aufgabenstellungen geeignet, für bestimmte Prozesse kommen aber auch spezielle rechentechnische Umsetzungen zur Anwendung.

Bei der mathematisch-analytischen Herangehensweise werden alle mathematischen Teilformulierungen der Gesetzmäßigkeiten in ein Gleichungssystem integriert und dieses gelöst. Diese Herangehensweise wird auch als „eindimensionale“ Lösung bezeichnet, da alle richtungs- und raumbezogenen Größen in die Gleichung in vereinfachter Form eingehen. Die durch diese Vereinfachungen in die Berechnung eingebrachten Fehler müssen sorgfältig ermittelt und ihre Auswirkungen auf die Ergebnisse bewertet werden, um die Zulässigkeit der Vereinfachung und die Qualität der erhaltenen Aussagen einordnen zu können. Das Ergebnis der Gleichung ist die Konzentration des jeweiligen Schadstoffes zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort.

Bei der Kompartiment-Lösung wird der gesamte zwei- oder dreidimensionale Fließraum rechentechnisch in eine Vielzahl kleiner Teilräume (z. B. in Würfel oder Quader) aufgeteilt, die untereinander verbunden sind. Die Größe der Kompartments kann variieren, je nachdem welche Variabilität in einem Kompartiment zu berücksichtigen ist und welche Fehler sich aufgrund der Durchschnittsbildung noch vertreten lassen. Jedem dieser Raumelemente werden verschiedene Eigenschaften zugeordnet (z. B. Durchlässigkeiten, Diffusionskonstanten, Porositäten, Sorptionscharakteristika).

Der auf einen bestimmten Zeitschritt bezogene Austausch von Stoffen eines Kompartments mit den jeweils angrenzenden Kompartimenten wird über Fließraten festgelegt, die im einfachsten Fall in eine Richtung verlaufen oder unterschiedlich festgelegte Hin- und Rückflüsse zu einem Nachbarkompartiment aufweisen. Das Rechenmodell läuft nach Zeitschritten ab. In jedem Zeitschritt erfolgen die Stoffübergänge (Ein- bzw. Ausstrag von Stoffen von bzw. in Nachbarkompartimente, Mischen des Stoffs innerhalb des Kompartments), Zerfallsschritte, Neueinstellung von geochemischen Bedingungen und

Sorptionsgleichgewichten, etc.. Das Rechenmodell liefert nach Ablauf eines jeden Zeitschritts die aktuelle Konzentration bzw. das Inventar des Schadstoffs in den einzelnen Kompartimenten, u. U. differenziert nach weiteren Eigenschaften (pH- und Eh-Wert, Bindungsformen, etc.).

Die Kompartiment-Modellierung ist mathematisch weniger anspruchsvoll und flexibler: das Modell kann bei zunehmendem Erkundungsfortschritt leichter an den fortgeschritteneren Kenntnisstand angepasst werden (z. B. die Genauigkeit der Fließraten im Kompartiment durch Berücksichtigung neuer Erkundungsergebnisse, die räumliche Auflösung durch eine Erhöhung der Anzahl an Kompartimenten, die physikalisch-chemische Aussagekraft durch ergänzende geochemische Gesetzmäßigkeiten und Details). Die analytische Lösung ist hingegen starrer und nur mit größerem Aufwand erweiterbar, sie ist aber in jedem Fall rechentechnisch weniger aufwändig als das einfachste Kompartimentmodell.

Die dritte Methode, das konzeptuelle Modell rechentechnisch umzusetzen, ist die Anwendung der Methode der finiten Elemente. Sie findet bei Aufgaben Anwendung, bei der die Kompartimentmethode zu grob wäre und die notwendige Verfeinerung zu einem übermäßigen Rechenaufwand führen würde. Regelmäßig ist dies der Fall bei Wirtsgesteinen, in denen der Durchfluss durch Klüfte die zentrale Rolle spielt. Der Durchfluss durch Klüfte ist mit einem Kompartimentmodell nicht sinnvoll abbildbar, da dieses entweder zu grobmaschig bleibt und nur für die Modellierung einer ganzen Region geeignet ist oder dessen Aufwand für die Auflösung einzelner Klüfte zu groß werden würde. Abb. 10 veranschaulicht die Modellabbildung solcher Klüfte in einem Festgestein.

Die dargestellten Klüfte wurden mittels eines Kluftgenerators erstellt; sie sind durchschnittlich räumlich gerichtet (anisotrop), aber weisen zufällig verteilte Geometrien, Größen und Abweichungen von der Hauptrichtung auf. Die Umsetzung solcher Kluftflächen im Rechenmodell erfolgt über Knotenpunkte, die mittels Flächen verknüpft sind. Zwei sich kreuzende Klüfte und die zugehörigen Knoten des Finite-Elemente-Modells sind in Abb. 11 skizziert.

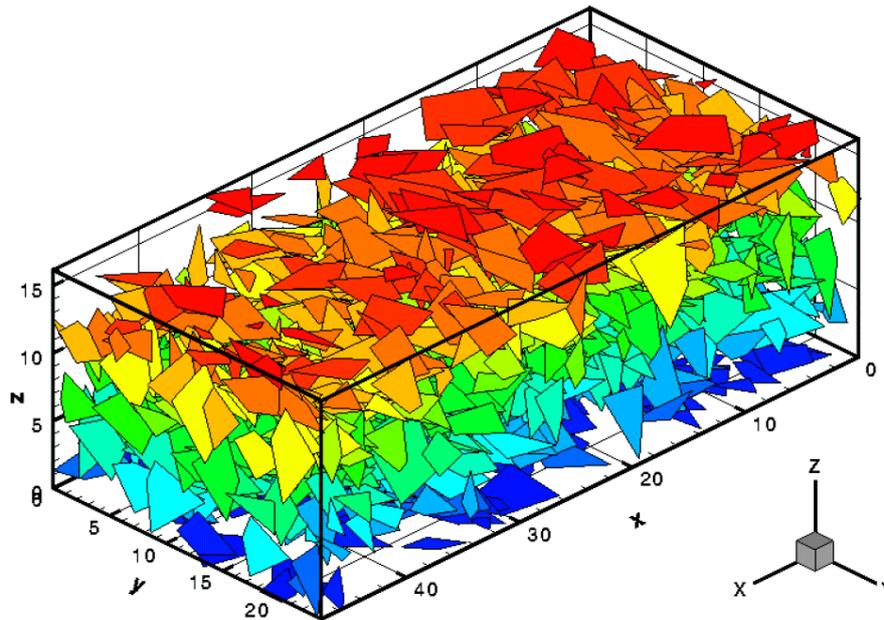


Abb. 10: Modellierung von Klufflächen in Festgestein, aus /GRS 98/

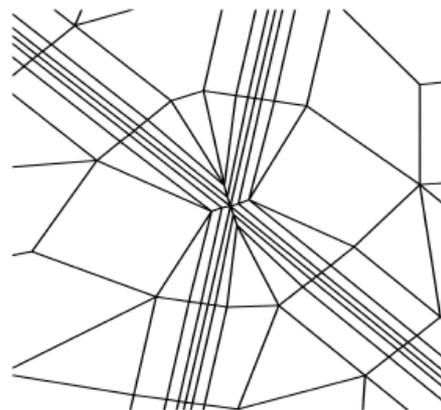


Abb. 11: Kreuzungspunkt zweier Klüfte und Diskretisierung in einem Finite-Elemente-Modell, aus /GRS 98/

Für Aufgaben dieser Art bietet das Finite-Elemente-Modell Vorteile, weil die Knotenabstände und –geometrien der notwendigen Auflösung ideal angepasst werden können: mehr Details, kleinere Knotenabstände bzw. höhere Knotendichte in sensitiven Bereichen (Diskontinuitäten, etc.) und größere Knotenabstände bzw. niedrigere Knotendichte in homogenen Bereichen. Als Beispiel ist in Abb. 12 die Verfeinerung des Netzes um ein zylindrisches Objekt gezeigt.

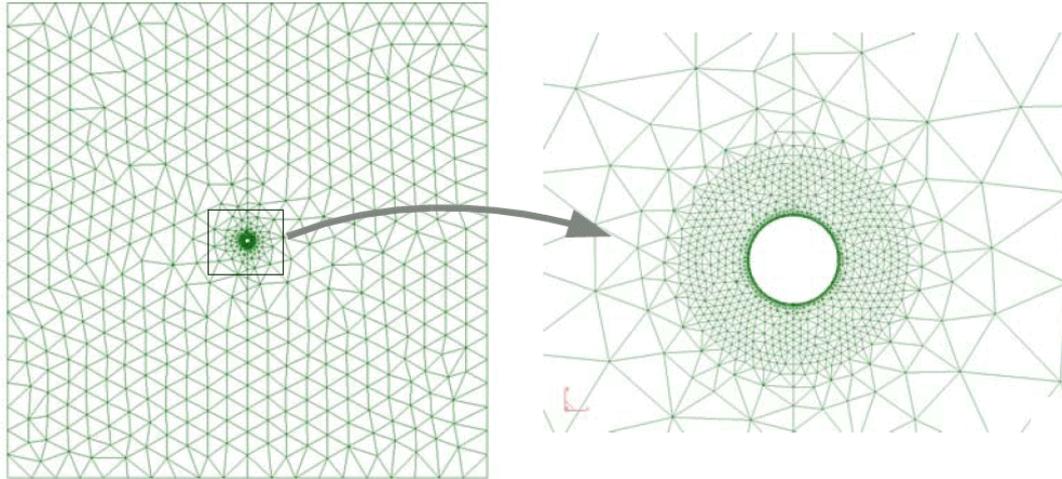


Abb. 12: Erhöhung der Knotendichte um ein zylindrisches Objekt (links grobe Darstellung, rechts vergrößertes Detail), aus /KOS 04/

Für die in Abb. 12 dargestellte Kluffverteilung lässt sich die Anzahl notwendiger Knoten dadurch verringern, indem isolierte Kluffflächen entfallen (kein Durchfluss) und nur vernetzte Klüfte berücksichtigt werden. Diese werden dann wiederum an den Vernetzungsbereichen verfeinert. Auf diese Weise wird ein Optimum zwischen dem Rechenaufwand und der notwendigen Auflösung des Finite-Elemente-Modells herbeigeführt.

Vergleiche von Ergebnissen aus verschiedenen rechentechnischen Umsetzungen

Um auszuschließen, dass durch die gewählte rechentechnische Umsetzung des Modells Fehler und Ungenauigkeiten eingebracht werden, können die Ergebnisse aus unterschiedlichen Typen von Umsetzungen der gleichen Konzeptualisierung miteinander verglichen werden. Die Abweichungen der Ergebnisse werden bewertet und die rechentechnischen Ursachen für relevante Abweichungen können identifiziert werden. Liegen die Ergebnisse aus unterschiedlichen Umsetzungen nur geringfügig auseinander, kann daraus die Eignung der betreffenden Rechenverfahren begründet werden und zusätzliches Vertrauen in die korrekte rechentechnische Umsetzung erreicht werden.

Als Beispiele für das Vorgehen werden in /KOS 04/ und in /LIT 03/ die Ergebnisse aus der Anwendung analytischer „eindimensionaler“ Lösungen der NAGRA mit anderen Formulierungen verglichen. In /KOS 04/ werden dazu verschiedene Teilmodelle mit der Finite-Elemente-Methode (FRACDVS) formuliert und die Ergebnisse mit den entspre-

chenden analytischen Lösungen verglichen. Abb. 13 zeigt beispielhaft die nach beiden Modellen berechneten Freisetzungsraten und die Rate für den Eintrag in die Biosphäre für das Nuklid Iod-129.

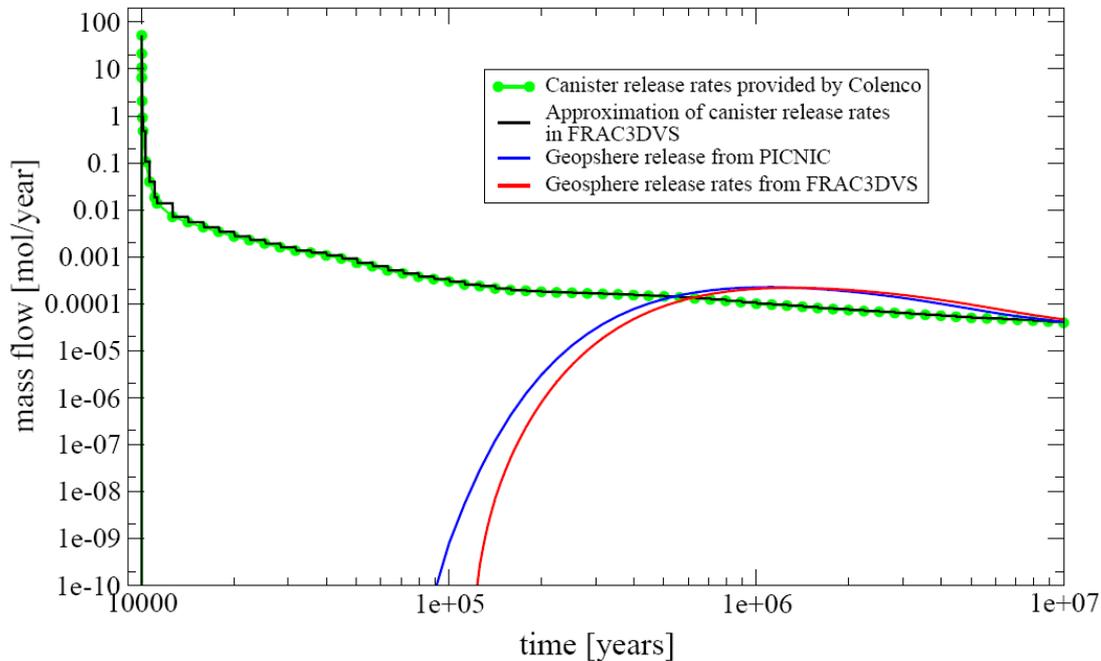


Abb. 13: Freisetzungsraten aus Behältern und Eintrag in die Biosphäre für Iod-129, berechnet nach verschiedenen Modellen, aus /KOS 04/

Wie aus Abb. 13 zu erkennen ist, stimmen die nach beiden mathematischen Modellen ermittelten Raten sowohl in ihrem Verlauf als auch mit ihren jeweiligen absoluten Werten gut überein. Lediglich der Zeitpunkt, zu dem das Nuklid die Biosphäre erstmals erreicht, unterscheidet sich nach beiden Rechenmodellen merklich (ca. Faktor 2 auf der Zeitskala). Der Unterschied bleibt aber für die Dosisrechnung (im Biosphärenmodell) ohne wesentliche Konsequenzen. Für andere Radionuklide sind die Unterschiede deutlich geringer.

Das Ergebnis des Vergleichs ist als Bestätigung zu werten, dass es im vorliegenden Fall ohne Belang ist, ob die Abläufe mit einem ein- oder mehrdimensionalen Modell simuliert werden. Dies kann nicht generell ausgesagt werden, da hierfür bestimmte Voraussetzungen gegeben sein müssen, die im hier untersuchten Fall zufälligerweise vorliegen.

Die Ergebnisse zeigen nicht nur die gute Übereinstimmung verschiedener mathematischer Lösungen für die gleiche Aufgabenstellung. Sie zeigen auch, dass es sinnvoll

und möglich ist, zur Erhöhung der Aussagequalität verschiedene Ansätze rechen-technischer Formulierungen zu verfolgen und diese sorgfältig zu vergleichen.

Im zweiten Beispiel ist in /LIT 03/ das Kompartimentmodell AMBER mit den analytischen Lösungen der NAGRA in /NAG 02c/ verglichen. Für den Durchfluss im Fernfeld ergeben sich für die wichtigsten Radionuklide die in Abb. 14 gezeigten Flussraten.

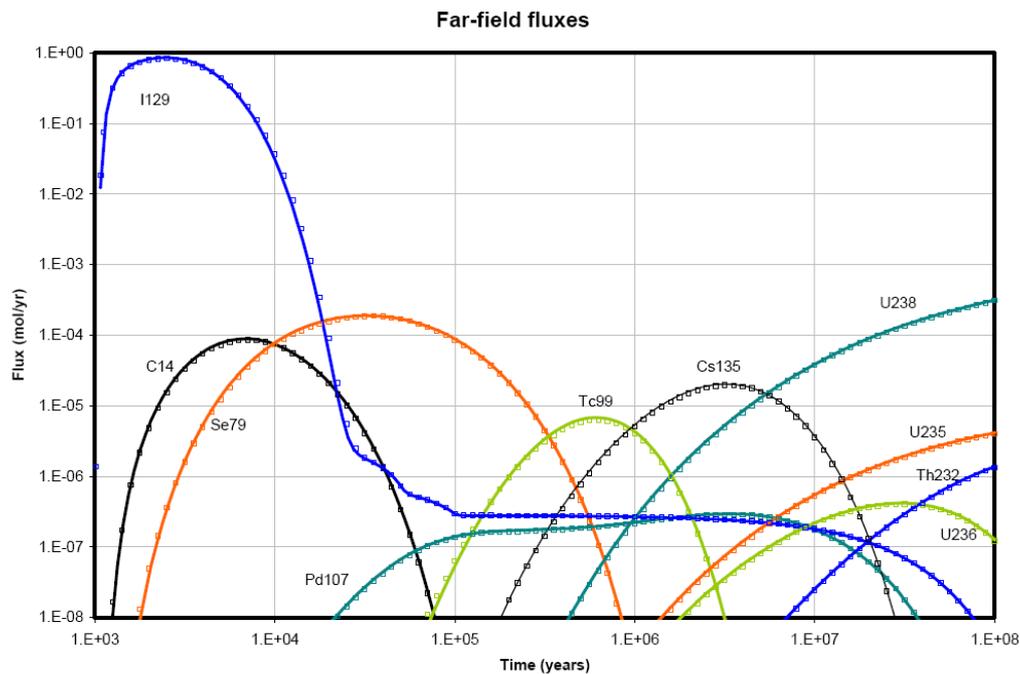


Abb. 14: Fernfeld-Durchflussraten nach analytischer Methode (Linien) und nach einem Kompartimentmodell (Quadrate/Punkte), aus /LIT 03/

Auch in diesem Vergleich ergeben sich nahezu deckungsgleiche Kurvenverläufe und Absolutwerte.

Insgesamt ist es also grundsätzlich möglich, die bei Langzeitsicherheitsrechnungen im Fernfeld angewendeten Rechenverfahren nach verschiedenen Ansätzen hin zu vergleichen und aus dem Ergebnisvergleich Aussagen über die Zuverlässigkeit des verwendeten Rechenmodells abzuleiten. Rechentechnische Vereinfachungen (z. B. die Eindimensionalität) sind überprüfbar. Sie sollten nach dem Stand von Wissenschaft und Technik Überprüfungen dieser Art unterzogen werden.

3.5.5 Biosphärenmodell

Für das aus der Geosphäre ausgetragene Inventar wird in einem Biosphärenmodell die Ausbreitung in die relevanten Umweltbereiche modelliert, verschiedene Nutzungen unterstellt und die darüber erhaltenen Strahlenexpositionen für Menschen ermittelt. Ein sehr umfangreiches Biosphärenmodell ist in Abb. 15 skizziert. Einseitige Pfeilrichtungen symbolisieren einen Übergang von Radionukliden in einen anderen Bereich, zweiseitige einen Austausch.

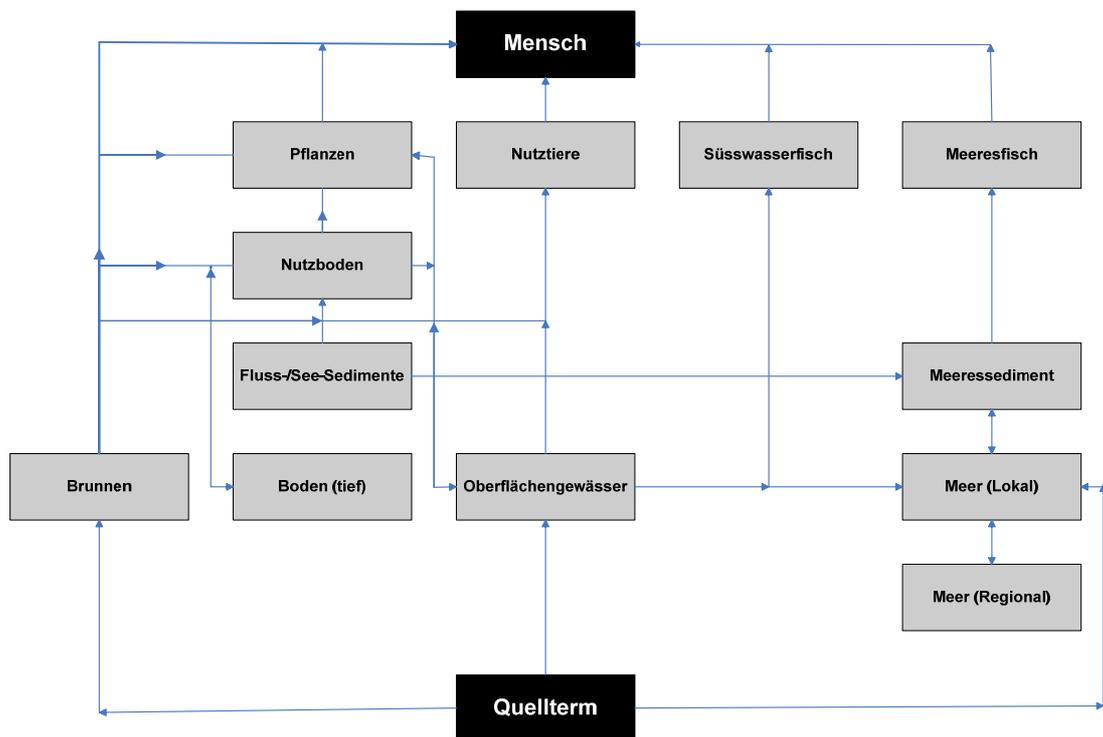


Abb. 15: Biosphärenmodell mit vielfältigen Nutzungszusammenhängen, vereinfacht nach /PRÖ 04/

Es gibt weder internationale noch nationale Festlegungen darüber, welche der skizzierten Nutzungsarten mit welchen Parametern in die Berechnung eingehen sollten. Einige Nutzungsarten und der Nutzungsumfang variieren je nach nationalen oder lokalen Gegebenheiten bzw. Bedingungen (siehe z. B. /PRÖ 04/). Es haben sich daher sowohl nationale Eigenarten (wie z. B. Ernährungsgewohnheiten) wie auch standortspezifische Betrachtungsweisen herausgebildet, welche der in der Abb. 15 gezeigten Pfade in welchem Umfang berücksichtigt und welche vernachlässigt werden.

Die Zusammenhänge in Abb. 15 erscheinen auf den ersten Blick komplex, lassen sich aber nach Festlegung der relevanten Parameter (Eigenschaften der verschiedenen

Umweltbestandteile, Nutzungsgewohnheiten, Abreicherungsvorgänge, Anreicherungs- und Transferraten, etc.) mathematisch mit einfachen linearen Gleichungen beschreiben. Zur rechnerischen Vereinfachung wird die Modellierung einmalig durchgeführt, jedem Nuklid wird ein Faktor zugeordnet, mit dem die Resultate aus der Berechnung des Fernfelds zu multiplizieren sind, um die daraus resultierende Strahlenexposition zu erhalten. Eine umfangreiche Modellierung der Einzelprozesse und deren Integration in das Gesamtmodell, wie sie für das Nah- und Fernfeld beschrieben wurde, ist für das Biosphärenmodell nicht erforderlich.

Eine Variation ist denkbar, wenn das Biosphärenmodell in unterschiedlichen Klimaphasen unterschiedliche Bedingungen abbilden soll. Dies macht einen Sinn, weil Nutzungsarten und -gewohnheiten, Bodenbedingungen, Transferfaktoren und viele andere Parameter unter unterschiedlichen Klimabedingungen sehr stark variieren /TEX 03/ und die Auswahl der jeweils ungünstigsten Bedingungen zu einer Überschätzung der Expositionen führt. Um diese Klimaabhängigkeit zu berücksichtigen, werden die unterschiedlichen Klimazyklen einmalig durchgerechnet und für jeden Zyklus ein Set an Faktoren angelegt, mit dem der Quellterm aus der Fernfeldmodellierung nuklidspezifisch multipliziert wird, um die Strahlenexposition zu erhalten.

4 Sicherheitsanalytische Bewertungen zu den Barriereigenschaften – Referenzkonzepte für Steinsalz, Tonstein und Granit

Ein Endlager in einer tiefen geologischen Formation besteht aus einem System von Barrieren. Barrieren sind natürliche oder künstlich geschaffene Sperren, deren Aufgabe es ist, den Zutritt von Flüssigkeiten zu den Abfällen und/oder die Ausbreitung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen bis in die Biosphäre merklich zu behindern. Das Barrierensystem ist sehr sorgfältig auszulegen. Die wichtigste Rolle spielt dabei selbstverständlich der Sicherheitsaspekt, d.h. das Gesamtsystem muss sicherstellen, dass Schadstoffe nicht oder nur in unbedenklichen Konzentrationen in die Biosphäre gelangen können. Dies muss auch unter ungünstigsten Bedingungen gewährleistet sein. Auf der anderen Seite wird man unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bemüht sein, jeden Aufwand zu vermeiden, der für die Sicherheit keinen nennenswerten Gewinn bringt. Aufgrund seiner Komplexität erfordert die Optimierung des Barrierensystems eine sorgfältige sicherheitsanalytische Bewertung der Barriereigenschaften sowohl einzeln als auch im Gesamtzusammenhang. Dabei sind die Besonderheiten der verschiedenen möglichen Wirtsformationen zu berücksichtigen.

Funktionelle Anforderungen an die Barrieren im Bezug auf die Sicherheit des Systems werden als Sicherheitsfunktionen bezeichnet. Die Sicherheitsfunktionen lassen sich unter den drei Schlagwörtern „Verhindern, Verzögern, Verdünnen“ zusammenfassen:

Verhindern: Es ist so weit wie möglich zu vermeiden, dass Schadstoffe überhaupt in die Biosphäre gelangen. Ein möglichst großer Anteil des Inventars sollte also dauerhaft isoliert bleiben. Dies kann durch physikalischen Einschluss oder chemische Immobilisierung geschehen.

Verzögern: Erfolgt die Ausbreitung eines Schadstoffs zeitlich stark verzögert, dann nimmt dessen Maximalkonzentration deutlich ab, weil sich die ausgetragene Gesamtmenge auf einen langen Zeitraum verteilt. Kommt zu der zeitlichen Verzögerung noch der radioaktive Zerfall hinzu, ergibt sich ein günstiger Zusatzeffekt.

Verdünnen: Das integrale Gefährdungspotenzial einer in die Biosphäre eingebrachten Schadstoffmenge wird aus physiologischen Gründen i. A. mit abnehmender Konzentration geringer. Grundsätzlich ist daher anzustreben, freigesetzte Schadstoffe möglichst stark zu verdünnen.

Für eine quantitative Bewertung von Barriereneigenschaften werden geeignete Maßgrößen benötigt. Physikalische oder chemische Parameter wie Permeabilitäten oder Verteilungskoeffizienten können im Prinzip experimentell bestimmt werden und charakterisieren die Barriere, sind aber für eine Bewertung der Barrierenfunktionalität im Gesamtsystem nicht geeignet. Zu diesem Zweck werden rechnerische Größen verwendet, die in ihrer zeitlichen Entwicklung im Modell vorausberechnet werden können und damit unmittelbare Rückschlüsse auf die Wirkung von Teilsystemen oder einzelnen Barrieren im Hinblick auf eine bestimmte Sicherheitsfunktion erlauben. Solche Größen werden als Performance-Indikatoren bezeichnet. Als Performance-Indikatoren können z.B. Schadstoffströme oder -konzentrationen dienen.

4.1 Geologische Barrieren

Unter der geologischen Barriere werden alle geologischen Formationen verstanden, die zu einer Rückhaltung von Radionukliden und einer sicheren Lagerung der radioaktiven Abfälle beitragen. In diesem Kapitel wird auf sicherheitsanalytische Bewertungen für ausgewählte geologische Barrieren eingegangen und es werden Erfahrungen aus den Langzeitsicherheitsanalysen für die verschiedenen Wirtsgesteine aufgezeigt.

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

Die zu dieser Zeit vorgelegten Sicherheitsanalysen waren überwiegend generisch angelegt, d.h. den Berechnungen lagen keine systematisch ausgewerteten konkreten Standortdaten zugrunde. Die angenommenen geologischen Verhältnisse waren auf dem Stand der damaligen Kenntnisse als idealtypisch und durchschnittlich anzusehen. Typisch lagen die Ergebnisse dieser Analysen im Maximum um viele Größenordnungen unter den heute zulässigen Expositionen (z.B. /SKB 83/).

Einen Überblick über die bis 1997 durchgeführten Analysen zur Langzeitsicherheit liegt in /NEA 97/ vor. Hier werden auch Empfehlungen für die Strukturierung der entsprechenden Reports gegeben. Im Folgenden werden zu den Referenzkonzepten auch Er-

gebnisse neuere Analysen dieser Art aus dem Ausland kurz vorgestellt, um die Effekte der geologischen Barriere zu veranschaulichen.

Der generelle Ablauf von Sicherheitsanalysen wurde in den vorausgehenden Kapiteln erläutert. Im Folgenden wird die Funktionsweise der geologischen Barriere in den Referenzkonzepten Steinsalz, Tonstein und Granit und die jeweiligen sicherheitsanalytischen Bewertungen beschrieben.

4.1.1 Referenzkonzept Steinsalz

Die Sicherheitsanalysen zeigen, dass die wesentliche Barriereeigenschaft von Steinsalz einerseits dessen Undurchlässigkeit und geringe Diffusion sowie andererseits die Konvergenz des Salzes ist. Bei einer Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Steinsalz werden die Abfallbehälter aufgrund der Konvergenz des Salzes nach einer gewissen Zeit vollständig von der geologischen Barriere umschlossen. Die Geschwindigkeit des Konvergenzprozesses hängt von verschiedenen Faktoren ab (z. B. Tiefe und Gebirgsdruck, Temperatur, Distanz zu relativ „starren“ Salzbereichen). Die Zeit bis zum Abschluss des Konvergenzprozesses reicht von einigen zehn Jahren bis zu einigen hundert Jahren. Die Konvergenz hat in sicherheitsanalytischer Hinsicht folgende Auswirkungen:

- Die Hohlräume verschließen sich im Laufe der Zeit vollständig. Werden bei diesem Vorgang Bruchgrenzen unterschritten (abhängig von Größe und Form der Hohlräume, Verfüllung und Verfüllungsgrad, etc.), verläuft dieser Vorgang störungsfrei. Sind die Hohlräume konvergiert, ist ein Zudringen von Lösungen in den Endlagerbereich nicht mehr möglich.
- Die in der Auflockerungszone vorhandene höhere Durchlässigkeit wird durch das Schließen der Hohlräume wieder reduziert und schließlich gänzlich aufgehoben.
- Der Verschluss der Einlagerungshohlräume und deren Konvergieren führen zum vollständigen Einschluss der Abfallbehälter, so dass eindringende Lösungen nicht mehr zu den Endlagerbehältern gelangen können.

Aus Sicht der sicherheitsanalytischen Bewertung ist es daher am günstigsten, den Umfang an aufgefahrenen Hohlräumen und die Dauer ihrer Offenhaltung zu minimieren,

bei der Auffahrung möglichst schonende Verfahren anzuwenden und die Hohlräume nach der Einlagerung zügig zu verfüllen.

Für den dauerhaften Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist es wichtig, dass der gesamte Salzkörper eine ausreichende Mächtigkeit aufweist und durch das Deckgebirge vor Subrosion geschützt ist. Die Deckgebirgsschichten (Tone, Gips) bewirken, dass der Salzkörper nicht unmittelbar mit wasserführenden Schichten in Kontakt ist und der Abtrag des Salzkörpers auf eine geringe Diffusion beschränkt bleibt. Die durch Grundwässer bewirkte Auflösung von Salz führt dabei zu hochsalinaren Lösungen, die nicht unmittelbar abfließen können und erst durch das gering durchlässige Deckgebirge diffundieren müssen. Dieser Vorgang erfolgt nur sehr langsam, was den Abtrag von Salz begrenzt. Beim Abtrag bleiben zudem unlösliche Bestandteile (Tone, Gipse) ungelöst zurück und verbleiben als sogenanntes Hutgestein an der Oberfläche des Salzkörpers. Sie tragen wiederum zu einer Verringerung der Subrosion bei und verstärken die Schutzwirkung des Deckgebirges.

Weiterhin ist es als günstig zu werten, dass Lösungen in der Nähe des Salzkörpers hochsalinär sind und daher eine größere Dichte besitzen als geringer mineralisiertes Grundwasser („Süßwasser“). Dieser erhebliche Dichteunterschied führt dazu, dass die Lösungen nicht zum Aufstieg neigen und sich nur in geringerem Umfang mit den oberflächennahen Grundwässern mischen.

Weitere günstige Eigenschaften ergeben sich aufgrund der herrschenden hydrologischen Verhältnisse innerhalb des Salzkörpers. Eine solche günstige Bedingung ist, dass es innerhalb des Salzkörpers i. d. R. keine zirkulierenden Lösungen oder Wässer gibt. Im Salzkörper gelegentlich vorhandene Lösungseinschlüsse stammen nach den bisherigen Erfahrungen aus der Genese des Salzkörpers und blieben dort über sehr lange Zeiträume eingeschlossen. Sie sind hydrologisch inaktiv und können als Beleg für die langfristige Stabilität des Salzkörpers gewertet werden. Der Nachweis über die Herkunft und das Alter von Lösungen im Salzkörper kann mit geochemischen Methoden geführt werden (/HER 83, HER 98, BGR 07/).

Aufgrund der Konvergenz und der geringen Durchlässigkeit wird in den Sicherheitsberechnungen davon ausgegangen, dass im Referenzfall eine Ausbreitung von Radionukliden in der geologischen Barriere lediglich durch diffusive Prozesse in der Auflockerungszone erfolgt. In der Auflockerungszone diffundieren Radionuklide am weitesten in das Salz hinein. Dieser Effekt ist im ungestörten Salzkörper praktisch vernachlässigbar. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit und der geringen Diffusion gelangen

keine radioaktiven Schadstoffe nach außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches.

Im Rahmen der normalen Entwicklung ist mit einer Reduzierung der Mächtigkeit der geologische Barriere durch Subrosionseffekte und / oder Uplift zu rechnen. Unter europäischer Trägerschaft wurde zwischen 1982 und 1988 PAGIS („Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste“) erarbeitet /PAG 88a/. PAGIS umfasste Referenzstandorte für die Wirtsgesteine Granit, Steinsalz, Tiefsee-Sedimente und Ton. In der Studie PAGIS /PAG 88b/ wird davon ausgegangen, dass durch die Subrosion im Laufe der Zeit die geologische Barriere vollständig erodiert ist und die Abfallbehälter freigelegt werden. Bei einer erwarteten Subrosionsrate von 0,033 mm/a und einer Tiefenlage des Endlagers in 500 m würde eine Freilegung der Abfallbehälter und damit eine Freisetzung von Radionukliden nach ca. 15 Mio. Jahren erfolgen. Die Gesamtdosis bei diesem Ablauf beträgt nach /PAG 88b/ maximal 0,967 $\mu\text{Sv/a}$. Bei der Ermittlung der Subrosionsrate sind künftige Klimaänderungen die wesentliche Einflussgröße.

Neben den erwarteten Entwicklungen werden in den Sicherheitsanalysen Szenarien modelliert, mit denen unwahrscheinlichere Entwicklungen abgebildet werden. Abweichend vom Referenzszenario wird bei einer Endlagerung im Steinsalz in den Sicherheitsberechnungen betrachtet, dass vor dem Konvergieren der Hohlräume Lösungen in den Nahbereich der Behälter zutreten. Diese gelangen entweder durch einen plötzlichen Lösungseinbruch entlang in den Salzkörper eingeschalteten Anhydritlagen oder durch den Zufluss aus unerkannten Lösungseinschlüssen innerhalb des Salzes in den Bereich, in dem die Abfälle lagern. In der im Hohlraum zur Verfügung stehenden Lösung lösen sich in diesem Szenario bis zur Sättigung gewisse Mengen an Radionukliden. Der Umfang hängt von dem elementspezifischen Lösungsverhalten ab. Es wird weiter angenommen, dass diese Lösung entlang der höher durchlässigen Anhydritlagen nach außerhalb der geologischen Barriere und schließlich in die Biosphäre transportiert wird.

Die Sicherheitsanalysen zeigen, dass selbst in diesem Szenario die Schutzziele eingehalten sind. Dies gilt auch dann, wenn erhöhte Fließgeschwindigkeiten entlang der Anhydritlagen unterstellt werden. Die maximalen Dosen resultieren dabei aus Cs-135, Np-237, Se-79 und U-233 (siehe Abb. 16).

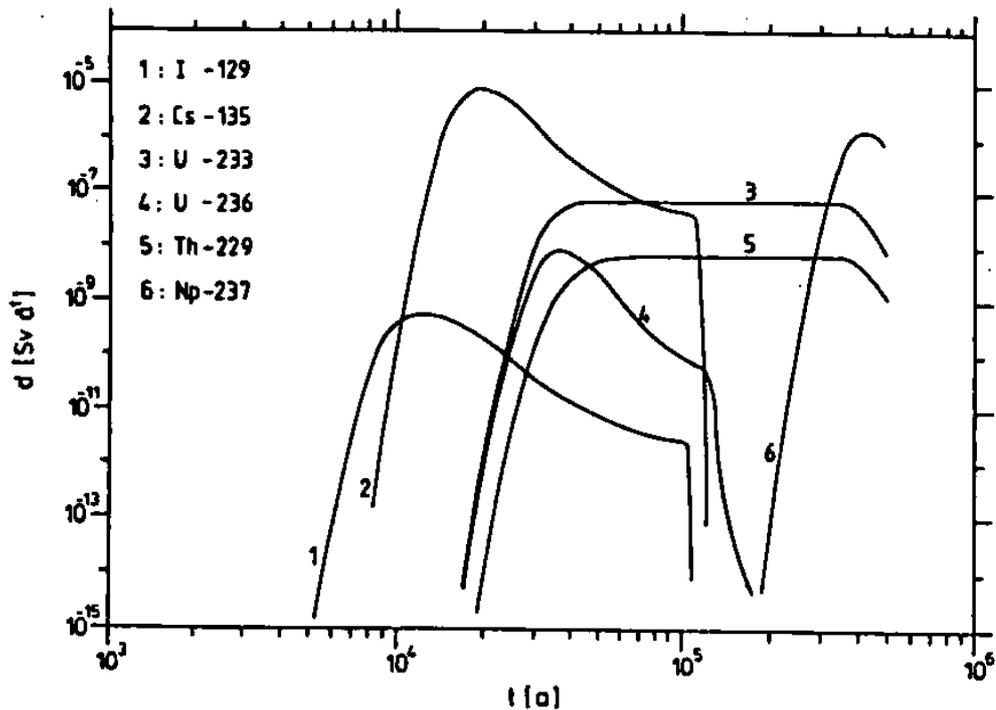


Abb. 16: Dosisverlauf im Szenario „Laugenzutritt und Austritt über den Hauptanhydrit“ für den Standort Gorleben, aus /PAG 88b/

Ein weiteres Szenario, das bei der Sicherheitsanalyse in Salzgesteinen berücksichtigt wird, ist die Störung der geologischen Barriere durch eine anthropogene Intrusion /PAG 88a/. Dies führt zu einer beschleunigten Freisetzung von Radionukliden. Auch in diesem Szenario werden nach den Sicherheitsanalysen die in diesem Fall anzuwendenden Schutzziele eingehalten.

4.1.2 Referenzkonzept Ton

Bei den Sicherheitsbewertungen für Endlager in Ton – und Tonsteinen haben sich folgende Eigenschaften als entscheidende Größen in Bezug auf die Langzeitsicherheit herausgestellt:

- Wichtig im Ton ist seine geringe hydraulische Durchlässigkeit und die niedrige Diffusionsrate.
- Weiterhin sind seine günstigen geochemischen Eigenschaften entscheidend.

- Eine ausreichend große Mächtigkeit der geologischen Barriere muss gegeben sein.

Die geringe hydraulische Durchlässigkeit hat zur Folge, dass die Wasserbewegungen und damit auch der Transport von Radionukliden sehr langsam erfolgen. Dieser Effekt wird verstärkt durch die Abwesenheit von Klüften und Störungen. Günstig ist es außerdem, wenn die Tone ein hohes Selbstheilungsvermögen besitzen, so dass sich eventuell bildende Störungen und Klüfte nach einiger Zeit wieder selbsttätig verschließen. Der wesentliche Transportmechanismus im Tonstein ist die Diffusion. Die geringe Diffusionsrate führt dazu, dass der überwiegende Anteil der aus den Behältern freigesetzten Radionuklide für lange Zeit in der unmittelbaren Umgebung des Behälters verbleibt und sich erst langsam über die Tonschicht verteilt.

Die günstigen geochemischen Eigenschaften führen zu einer zusätzlichen Immobilisierung von Radionukliden, z. B. durch Sorption bzw. durch Aufrechterhaltung reduzierender Bedingungen.

Die Sicherheitsanalysen für Tongesteine zeigen, dass die geologische Barriere die weitaus meisten, aber nicht alle Radionuklide in den für den Nachweis relevanten Zeiträumen vollständig einschließen kann. Der im Referenzfall rein diffusive Transport wird bei günstigen Eigenschaften der Barriere im Referenzfall jedoch durch die geringe Diffusionsgeschwindigkeit, die Rückhaltemechanismen und die langen Transportwege durch die mächtige Barriere so verzögert, dass keine Gefährdung für Mensch und Umwelt besteht /NAG 02c/. Für die Modellierung der Sicherheitsanalysen ist aus den oben genannten Gründen die Charakterisierung der geologischen Barriere und ihrer Eigenschaften sehr wichtig.

Beispiel Schweiz

In den Neunziger Jahren hat die schweizerische NAGRA den Entsorgungsnachweis für die Endlagerung in Opalinuston in der Nordschweiz erarbeitet und diesen im Jahr 2002 abgeschlossen. Bestandteil des Nachweises ist neben dem Nachweis der bautechnischen Machbarkeit und den geologischen Untersuchungen auch eine Analyse der Langzeitsicherheit /NAG 02c/.

Informationsquelle für den Nachweis waren die detaillierten übertägigen 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 Untersuchung basiert daher auf einem sehr hohen Grad an Standortdetails.

Im Referenzszenario wird von einem Versagen der Behälter, der Diffusion von Radionukliden durch die Opalinustonschicht und einem Eintritt der Radionuklide in wasserführende Schichten ausgegangen. Als Ergebnis wird bei der Sicherheitsberechnung festgestellt, dass im Referenzfall die meisten Radionuklide die Tonbarriere nicht durchdringen und diejenigen Anteile, die bis in die Biosphäre gelangen, im Grundwasser der überlagernden Deckschichten soweit verdünnt werden, dass die Schutzziele eingehalten sind /NAG 05c/. Radionuklide, die die geologische Barriere durchdringen, sind die langlebigen Isotope I-129, Cl-36 und Se-79 sowie das bei der Gasbildung freigesetzte C-14(org).

Die Abb. 17 zeigt die Expositions-dosis aus der Endlagerung abgebrannter Brennelemente.

Entscheidenden Einfluss auf die Dosishöhe hat die sehr langsame Ausbreitung der Radionuklide über die stark verzögerte Diffusion in der Opalinustonschicht. Bestimmende Radionuklide sind Kohlenstoff-14 auf dem Gaspfad und Iod-129 sowie Cl-36 auf dem Wasserpfad.

Unabhängig von den Eigenschaften der Barrieregesteine und ihrer Neben- und Deckgesteine wird die hydrogeologische Situation als zusätzliche Sicherheitsbarriere angesehen, da es beim Transport der Radionuklide in den das Endlager überlagernden grundwasserführenden Schichten bzw. in Oberflächenwasser zu einer Verdünnung der aus dem Endlager freigesetzten Aktivität kommen kann /NAG 05c/. In den bisherigen Sicherheitsanalysen wird von diesem Effekt jedoch kein Kredit genommen.

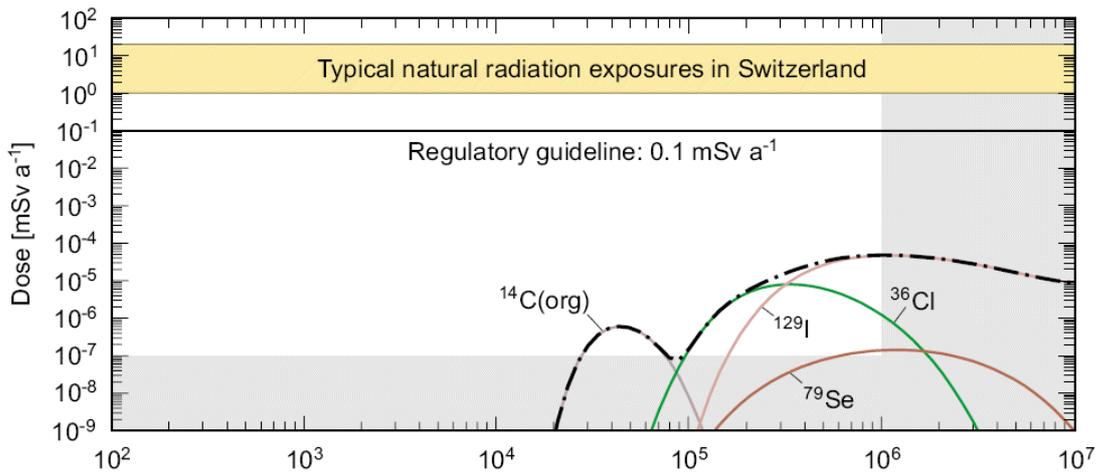


Abb. 17: Strahlenexposition im Referenzszenario aus der Endlagerung abgebrannter Brennelemente im Opalinuston, aus /NAG 02c/

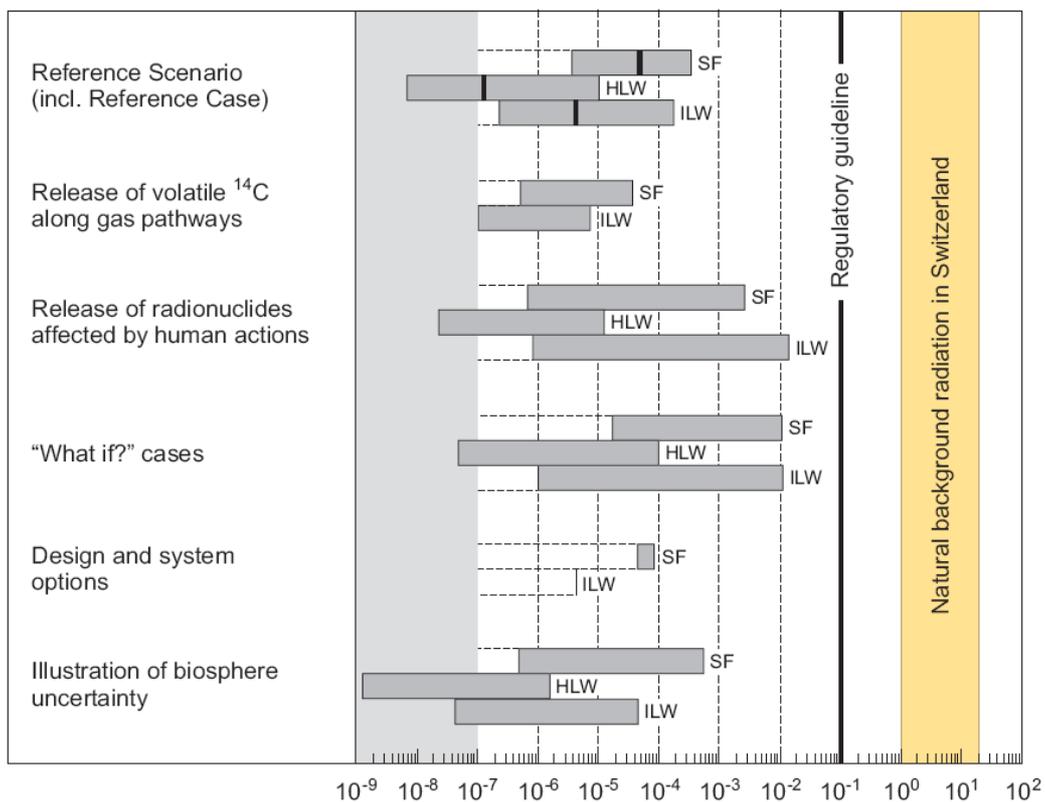


Abb. 18: Variationsbreite der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse beim Referenzfall und verschiedenen Varianten beim Entsorgungsnachweis Benken /NAG 02c/

Es zeigt sich, dass eine Freisetzung von volatilen Radionukliden wie C-14 entlang von Wegsamkeiten für Gase nicht ausgeschlossen werden kann. Deswegen wird ein solches alternatives Szenario in die Sicherheitsanalysen integriert /NAG 05c/. In Sicher-

heitsanalysen im Ton wurden wie beim Salz zusätzlich die anthropogenen Eingriffe in einem Szenario berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Alternativszenarien und „What-If“-Fälle für das Schweizer Konzept sind in Abb. 18 zusammengefasst. Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Grenzwert in allen Fällen eingehalten ist.

Beispiel Frankreich

Die in Frankreich zuständige Agentur ANDRA hat in Erfüllung ihres gesetzlichen Auftrags in 2005 zwei Studien abgeschlossen, die sich mit der Endlagerung in Ton /AND 05b/ und in Granit /AND 05a/ befassen. Der Modellierung liegt ein endzulagerndes Inventar von ca. 45.000 tSM abgebrannter Brennelemente und HAW zugrunde.

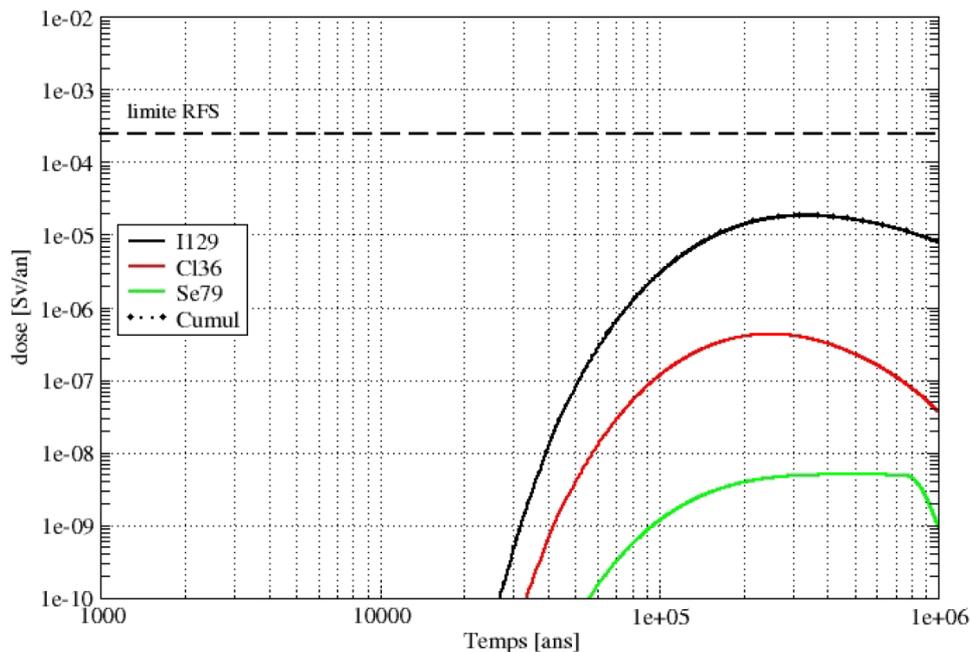


Abb. 19: Dosisbelastungen im Referenzszenario aus abgebrannten Brennelementen in einem Endlager in Ton (Abfallart „CU1“), aus /AND 05c/

Bei der Ton-Untersuchung 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 eng auf die Verhältnisse an diesem Standort bezogene Betrachtung.

Bei der Untersuchung der Langzeitsicherheit /AND 05c/ wird im Referenzszenario das Versagen der Behälter, die Ausbreitung in der Tonschicht und der Übergang in die Biosphäre modelliert. Ferner werden in zahlreichen Variationen Sensitivitäten untersucht. Ein Beispielergebnis des Referenzszenarios für die wichtigste Abfallart ist in Abb. 19 dargestellt.

Auch bei dieser Analyse sind die mobilen Radionuklide I-129, Cl-36 und Se-79 entscheidend an der Gesamtdosis beteiligt.

Beispiel Belgien

Nachdem in Belgien im Rahmen von PAGIS /PAG 88b/ ein erstes Performance Assessment für das Wirtsgestein Boom Clay erarbeitet worden war, hat die für die Endlagerung zuständige belgische staatliche Agentur ONDRAF/NIRAS in 2001 ihre umfangreiche, methodisch fortgeschrittene Langzeitsicherheitsuntersuchung für das Wirtsgestein Boom-Clay vorgelegt, SAFIR 2 /OND 01/.

SAFIR-2 basiert auf standortspezifischen Verhältnissen, wie sie aus der übertägigen Erkundung im Raum Mol und anhand des Untertagelabors HADES gewonnen wurden. Der Grad an Standortbezogenheit ist deutlich höher als noch in der PAGIS-Untersuchung, aufgrund fehlender Detailerkundungen und von untertägigen Erkundungen hat die Untersuchung aber noch einen erheblichen generischen Charakter.

Im Referenzszenario wird darin von einem frühen Versagen der Behälter ausgegangen, eine Ausbreitung per Diffusion durch den Boom-Clay und einem Brunnenszenario in der darüber bzw. darunter liegenden leitfähigen Schicht. Die Verzögerung bei der diffusiven Ausbreitung durch den Boom-Clay ist die wichtigste Barriere. Im Unterschied zu den dargestellten Beispielen Schweiz und Frankreich handelt es sich bei Boom Clay um einen wenig konsolidierten, also plastischeren Ton, mit höheren Diffusionsraten und einer deutlich geringeren Schichtdicke.

In Abb. 20 ist der Dosisverlauf beim Brunnenszenario dargestellt, ausgehend von der Endlagerung von 1.980 Tonnen abgebrannter Brennelemente.

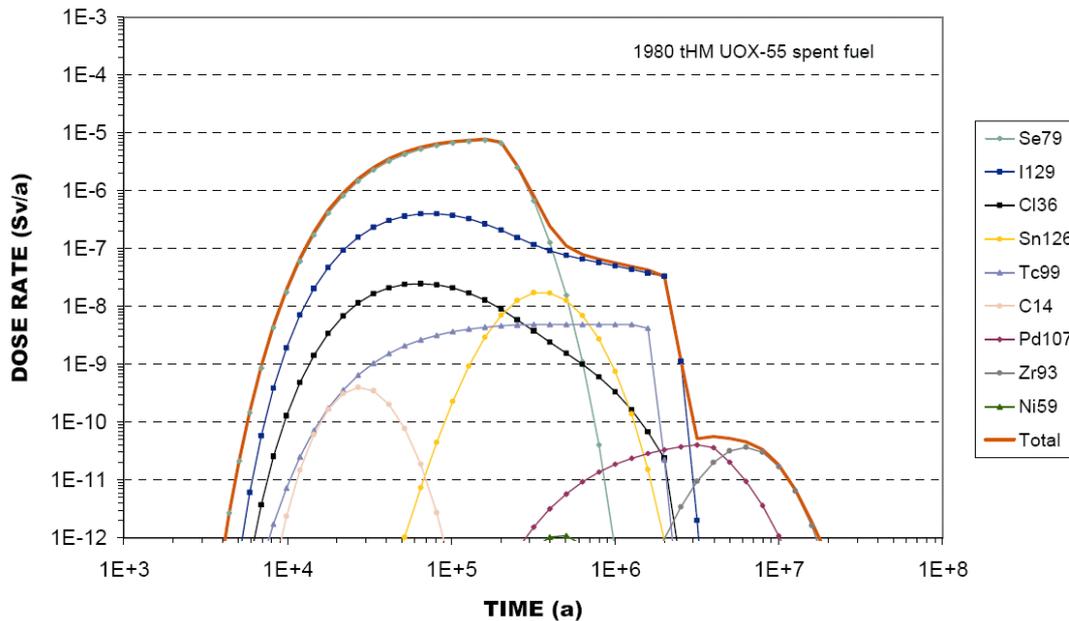


Abb. 20: Dosisverlauf bei der Endlagerung von 1.980 t abgebrannter BE und Ausbreitung über den Boom-Clay, aus /OND 01/

Die Ergebnisse zeigen, dass die ungünstigeren Eigenschaften der Boom Clay Barriere

- zu einem deutlich früheren Auftreten der mobilen Species in Umweltmedien führen (einige 1.000 Jahre),
- die Peak-Dosis deutlich früher erreicht wird,
- zusätzlich weitere mobile Spezies eine Rolle spielen, die in der schweizerischen und französischen Analyse innerhalb der Tonbarriere retardiert werden und radioaktiv zerfallen (z.B. Sn-126, Tc-99),
- trotz des deutlich niedrigeren Inventars vergleichbare Maximaldosen resultieren.

Für SAFIR-2 wurde ein Review der OECD/NEA durchgeführt /NEA 03a/.

4.1.3 Referenzkonzept Granit

Bei einer Endlagerung in granitischen Wirtsgesteinen liegt im Allgemeinen, aufgrund der hydraulischen Eigenschaften des Wirtsgesteins, das Hauptgewicht der Barrierewirkung auf den technischen und geotechnischen Barrieren, deren sicherheitstechnische Funktionen später in Kapitel 4.2 und 4.3 beschrieben werden. Die geologische Barriere

trägt jedoch ergänzend zur Begrenzung eines Schadstoffsaustrags in die Biosphäre während des im Langzeitsicherheitsnachweis geforderten Isolationszeitraums bei, indem sie stabile geomechanische und geochemische Verhältnisse gewährleistet, Radionuklide durch Sorption zurückhält und vor allem als mechanischer Schutz für die technischen und geotechnischen Barrieren wirkt. Wichtig sind also u. a. die Gewährleistung von reduzierenden Bedingungen, gute Sorptionseigenschaften, eine hohe Stabilität und günstige Spannungsverhältnisse.

Günstig wirkt auch ein regionales hydrogeologisches Regime mit möglichst geringen Grundwasserfließgeschwindigkeiten, durch das ein Zufluss und Abtransport von in dem Grundwasser gelösten Radionukliden verlangsamt wird /PAG 88a/. Je nach Standort und Behälterkonzept kann die Mineralisierung der Wässer, insbesondere deren Chloridgehalt, eine wichtige Rolle für die Korrosion spielen.

Das Hauptproblem in den Sicherheitsanalysen für granitische Wirtsgesteine ist die hohe hydraulische Durchlässigkeit aufgrund von Störungen und Klüften. Das Gestein Granit selbst ist zwar wenig durchlässig, aber es lassen sich keine großräumigen klüftungsfreien Bereiche charakterisieren, so dass diese in den Sicherheitsberechnungen berücksichtigt werden müssen /HSK 04, NAG 94, NAG 02a/. Für die Modellierung müssen Kenntnisse über die Ausbildung solcher Pfade und deren Vernetzung und Ausprägung vorliegen /NAG 02a/. Da man von der Existenz von solchen Wegsamkeiten ausgehen muss, sind für das Rückhaltevermögen der geologischen Barriere die großräumigen Fließigenschaften des Grundwassers und das Sorptionsvermögen der Kluftoberflächen des Granits für die Einhaltung der Sicherheit entscheidend /NAG 02a/. Letzteres ist radionuklidabhängig.

Im Referenzszenario wird in /SKB 99b/ davon ausgegangen, dass die geotechnische und die technische Barriere einen Großteil der Barrierefunktion übernehmen. Alternativ wird ein Szenario berechnet, das davon ausgeht, dass eine Teilmenge der Behälter beschädigt ist. Als weitere Alternativszenarien werden klimatische Effekte und tektonische Auswirkungen auf die geologische Barriere betrachtet.

Die Sicherheitsanalysen für eine Endlagerung im Granit zeigen, dass bei einem Versagen der geotechnischen und technischen Barriere die geologische Barriere nur beschränkt zu einer Rückhaltung von Radionukliden beiträgt. Nur sorbierende Radionuklide werden innerhalb der geologischen Barriere erfolgreich zurückgehalten /SKI 96, SKB 99b/. Nicht oder vernachlässigbar sorbierende Radionuklide wie I-129 können da-

gegen die geologische Barriere ohne nennenswerte Verzögerung durchdringen /SKB 99b, TIL 99/. Die Dosis dominierend sind nach der Kristallin-Studie der Nagra aufgrund ihrer hohen Löslichkeit und geringen Sorption Se-79 und Cs-135 /NAG 94/. Nach der kanadischen Sicherheitsanalyse durchdringen bei einem Versagen des Behälters I-129, C-14, Cl-36 die geologische Barriere /AEC 94/. Die Abb. 21 zeigt eine Zusammenstellung der erwarteten Dosiswerte, die in den verschiedenen Ländern für ein Endlagerkonzept in kristallinen Gesteinen berechnet wurden.

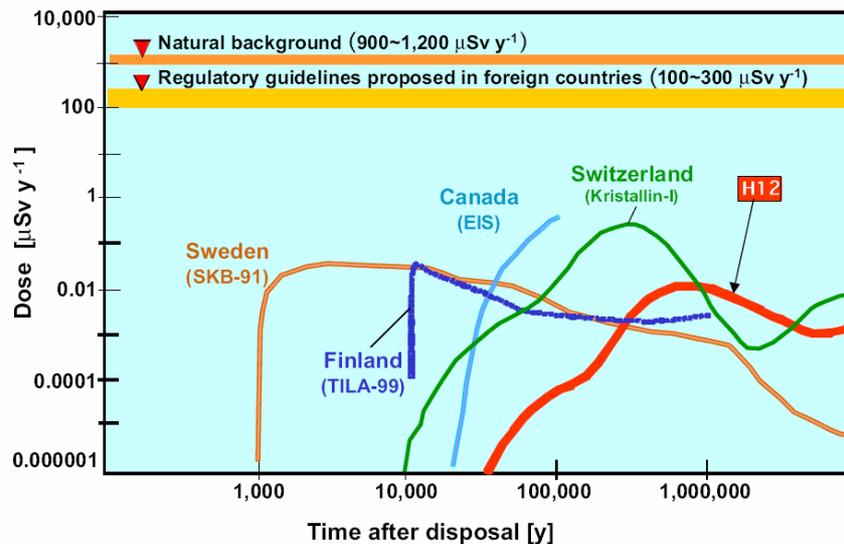


Abb. 21: Übersicht über Dosiswerte und –verlauf bei kristallinen Gesteinen, aus /JNC 00/

Gemeinsam ist den Analysen, dass die Expositionen in der Biosphäre relativ rasch nach dem unterstellten Behälterversagen beginnen und der Dosisverlauf die angenommenen Versagensmodi (plötzliches Versagen, langsamer Degradationsverlauf) widerspiegelt. Die geologische Barriere leistet nur einen geringen Beitrag zur Rückhaltung von Radionukliden.

4.1.4 Andere Wirtsgesteine

Als weiteres Beispiel für ein Wirtsgestein soll das weltweit am weitesten fortgeschrittene Endlagerprojekt in den USA beschrieben werden. Das US-DOE hat im Juni 2008 den Prüfantrag für das Endlager im Wirtsgestein Tuff der Regulierungsbehörde NRC zugeleitet und damit das Genehmigungsverfahren für Bau und Errichtung eingeleitet /DOE 08/.

Standort, Wirtsgestein, Konzept und Schutzstandards des beantragten Endlagers Yucca Mountain sind international recht untypisch:

- Die Lagerbereiche liegen oberhalb des Grundwasserspiegels, es handelt sich daher nicht um eine typische Endlagerung in tiefen geologischen Formationen.
- Es ist kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich abgegrenzt, das Wirtsgestein trägt nicht wesentlich zur hydrologischen Ausbreitungsverzögerung und zur Rückhaltung von Radionukliden bei.
- Der Standort liegt in einem tektonisch relativ aktiven Gebiet, zur Bewertung werden probabilistische Kriterien herangezogen.
- Die Lagerbehälter als wichtigste Barriere gegen Freisetzungen sind auf eine Haltbarkeitsdauer von 10.000 Jahren ausgelegt und werden jenseits dieses Zeitraums mit Versagens- und Freisetzungsszenarien bewertet.
- Der Kontakt der Behälter mit versickernden Niederschlagswässern ist aufgrund heutiger günstiger klimatischer Bedingungen (Wüste) in Verbindung mit der Erwärmung durch die Abfälle verringert, bei Veränderungen der klimatischen Bedingungen ist er aber möglich. Zur Verringerung der Korrosion soll dieser Kontakt mit technischen Maßnahmen (sogenannten Drip Shields) verringert werden.
- Der für die Prüfung anzulegende Schutzstandard („Individual Protection Standard“) der EPA, der Schutzstandards nur bis 10.000 Jahre festlegte und Schutzstandards jenseits dieses Zeitpunkts offen ließ, wurde in seiner verabschiedeten Fassung durch ein Urteil des Court of Appeals verworfen /COA 04/. Eine Neufassung ist zum Zeitpunkt der Beantragung erst im Entwurf fertig gestellt und schlägt für den Zeitraum jenseits von 10.000 Jahren einen ungewöhnlich hohen Grenzwert der Dosisbelastung von 300 mrem (3 mSv/a) fest /EPA 05/, ist aber noch nicht verabschiedet. Der Entwurf basiert also in seiner Höhe auf einer Verdopplung der natürlichen Hintergrund-Strahlenexposition und dürfte mit der international akzeptierten Grundforderung in Konflikt stehen, dass künftige Generationen keinen höheren Strahlenexpositionen aus der Endlagerung ausgesetzt sein dürfen als heute Existierende.

In dem mit dem Genehmigungsantrag eingereichten Langzeitsicherheitsnachweis /DOE 08/ ist die „normale Entwicklung“ dargestellt und es sind Störfälle wie das vorzeitige Versagen von Drip Shields und Behältern oder Einwirkungen durch vulkanische Aktivitäten und seismische Ereignisse untersucht. Bei der Normal-Entwicklung wird da-

von ausgegangen, dass Behälter jenseits von 10.000 Jahren versagen, Radionuklide in das Nahfeld freigesetzt werden, diese mit Sickerwässern bis in Grundwasser führende Horizonte gelangen und in 18 km Entfernung als Trinkwasser genutzt werden. Den entsprechenden Dosisverlauf in diesem Szenario zeigt Abb. 22.

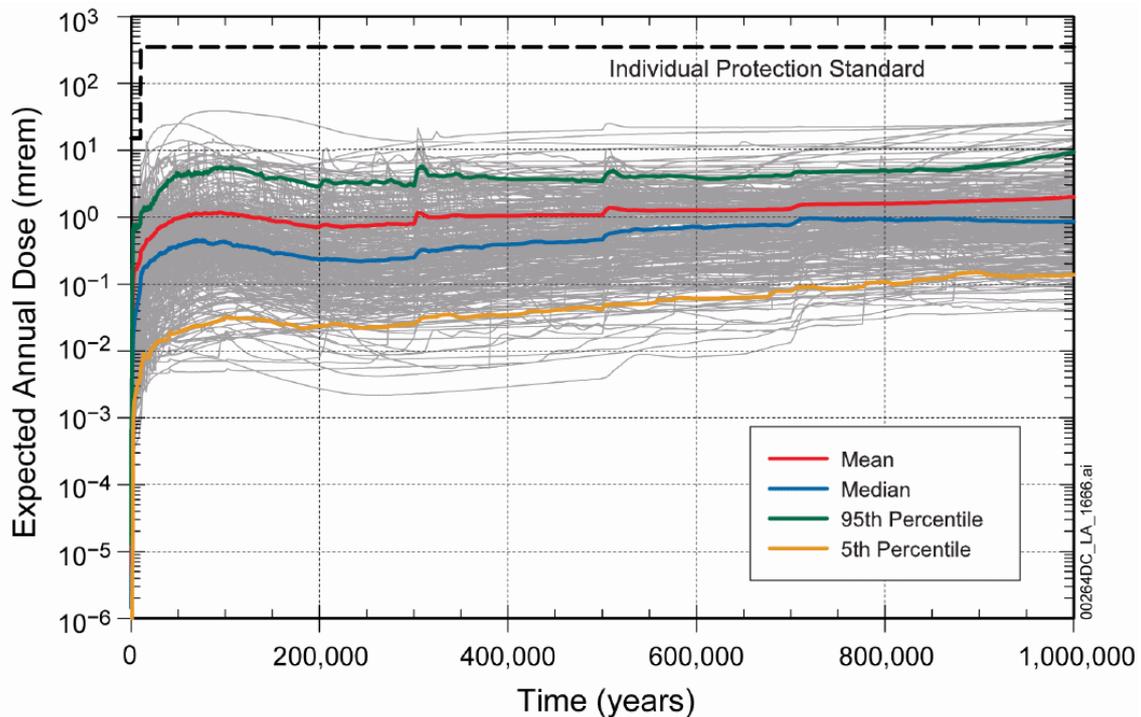


Abb. 22: Dosisbelastungen im Referenzszenario aus der Endlagerung im Tuff am Standort Yucca Mountain, aus /DOE 08/

Es ist erkennbar, dass der Abstand zwischen dem Schutzziel und dem Durchschnittswert aller Durchläufe weniger als zwei Größenordnungen beträgt. Wenn das Schutzziel für den Zeitraum bis 10.000 Jahre auch auf den Zeitraum jenseits von 10.000 Jahren Anwendung fände oder wenn vergleichbare Schutzziele wie in anderen Ländern (Deutschland, Schweden, Schweiz, etc.) zur Anwendung kämen, wäre der Abstand zum Schutzziel weniger als eine Größenordnung bzw. sogar überschritten. Die bei manchen Rechenläufen erkennbaren Oszillationen rühren von Klimawechseln her, die die Auslaugung und den Austrag in das Grundwasser schwächen bzw. verstärken. Die dosisbestimmenden Nuklide im Nachweis sind Technetium-99, Kohlenstoff-14, Se-79 und Iod-129. Allerdings spielen in diesem Fall auch Aktiniden wie Uran, Neptunium und Plutonium sowie deren radioaktive Zerfallsprodukte eine Rolle, die in Wirtsgesteinen wie Tonstein die geologische Barriere nicht erreichen und, wenn man die Wirkungslosigkeit des Buffers, der die eingelagerten Behälter umgibt, einmal unterstellt, nur eine äußerst geringe Durchdringung der Barriere aufweisen würden.

4.1.5 Bewertung durch Performance-Indikatoren

Die hauptsächliche Funktion der geologischen Barriere ist, dass diese einen Transport der Radionuklide verhindert oder zumindest entscheidend verzögert und zusätzlich einen mechanischen Schutz für die radioaktiven Abfälle darstellt. Die Funktionsweise der geologischen Barriere unterscheidet sich wie oben dargestellt jedoch bei den unterschiedlichen Wirtsgesteinen und ist zu dem abhängig von den Radionukliden. Um zu bewerten, ob die Barrierefunktion für die relevanten Radionuklide ausreichend erfüllt ist, werden Performance-Indikatoren gebildet.

Zunächst ist der Begriff „Performance-Indikator“ von anderen Indikatoren abzugrenzen: ein Performance-Indikator soll die Leistung der geologischen Barriere quantitativ bewerten. Von einem „Sicherheitsindikator“ erwartet man hingegen eine sicherheitsbezogene Bewertung und damit eine wesentlich umfassendere Aussage. In /JON 04/ sind die verschiedenen Facetten von Sicherheitsindikatoren umfassend untersucht und bewertet. Als übergeordnete Performance-Indikatoren sind Risiko- und Dosisgrenzwerte sinnvoll, die jeweils nicht überschritten werden dürfen. Empfehlungen dieser Art sind in /IAE 94/, /OND 01/, /STU 01/ und /SKB 99b/ enthalten. In manchen Ländern wird zusätzlich zu Individualdosis und –risiko auch die kollektive Dosis als Performance-Indikator verwendet /OND 01/. Hier sollen im Folgenden ausschließlich die Performance-Indikatoren für die geologische Barriere beschrieben werden.

Die für die Bewertung der sicherheitstechnischen Funktion der geologischen Barriere sinnvollen und real verwendeten Performance-Indikatoren unterscheiden sich in den verschiedenen Endlagerkonzepten voneinander /JON 04/. Im schwedischen Konzept wurde als Performance-Indikator für die Geosphäre neben anderen das Kriterium des Einschlusses von Radionukliden genannt (containment index) /SKB 99a/.

Allgemein lassen sich folgende Anforderungen an Indikatoren formulieren. Nach den Empfehlungen der IAEA sind Performance-Indikatoren für die Barrierewirkung der Transport („flux“) und die Konzentration von Radionukliden in der geologischen Barriere /IAE 94/. Als Kriterium für den Transport können z.B. Transportdistanzen der einzelnen Radionuklide innerhalb der geologischen Barriere /NAG 02c/ oder Ankunftszeiten der Radionuklide in der Biosphäre betrachtet werden /SKB 99a/.

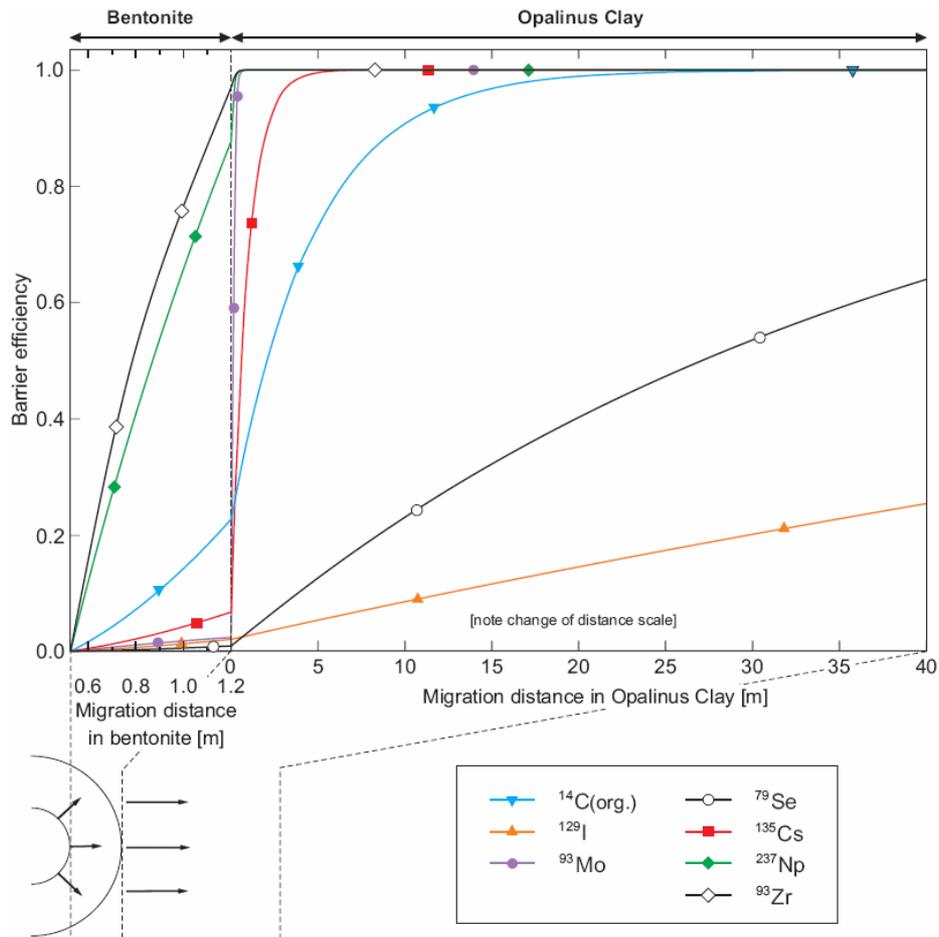


Abb. 23: Beispiel für die Performance der geologischen Barriere Tonstein, aus /NAG 02c/

Abb. 23 zeigt als Indikator für die Effizienz der Tonbarriere, welche Distanzen verschiedene Radionuklide in der Tonbarriere zurücklegen.

Das Beispiel in Abb. 23 zeigt, dass im vorliegenden Fall

- die Performance der geologischen Barriere für die Radionuklide I-129, Se-79, C-14, Cs-135 und Mo-93 eine wichtige Rolle spielt,
- davon die Radionuklide C-14, Cs-135 und Mo-93 vollständig in der geologischen Barriere verbleiben und dort radioaktiv zerfallen, wobei die Tiefe des Eindringens in die Barriere für die Radionuklide unterschiedlich ist, und dass
- die Radionuklide I-129 und Se-79 in der geologischen Barriere nur teilweise zurückgehalten werden.

Bei dem Beispiel ist, wie bei allen Performance-Indikatoren für die geologische Barriere, zu beachten, dass Radionuklide, die die geologische Barriere gar nicht erreichen, auch nicht im Indikator abgebildet werden. Um auch diese abzubilden, müsste von dem What-If-Fall ausgegangen werden, dass Behälter und diesen umgebende Buffermaterialien nicht zur Rückhaltung beitragen. Erst damit ergäbe sich ein vollständiges Bild der alleinigen Performance der geologischen Barriere.

Weitere Performance-Indikatoren verwenden die Konzentration. Die Konzentration von Radionukliden in der geologischen Barriere hängt zum einen von den Freisetzungsraten („release constraints“), z. B. /STU 01/ und /SKB 99a/, und von Verdünnungseffekten (dilution index) ab /SKB 99b/.

In der Schweiz wird neben der Konzentration und des Transports der Radionuklide die Verteilung der Radioaktivität innerhalb der Barriere als Performance-Indikator verwendet /NAG 02c/.

Eine weitere Möglichkeit zur exakt rechnerischen Abbildung der Barrieren-Performance bestünde darin, Dosiswerte ohne oder mit zwischengeschalteter geologischer Barriere zu errechnen. Das Verfahren hätte den Vorteil, dass es mehr noch als die Nukliddurchflüsse oder Konzentrationen den Gesamteffekt auch aller vollständig zurückgehaltenen Radionuklide und den radioaktiven Zerfall innerhalb der geologischen Barriere allein korrekt abbilden würde. Dies wird derzeit nicht praktiziert und die Aussagekraft eines solchen Indikators kann daher nicht abschließend überprüft werden.

Insgesamt ist es nach heutigem Stand möglich, die Performance der geologischen Barriere in Indikatoren geeignet abzubilden. Die verwendeten Indikatoren sind anschaulich und verdeutlichen angemessen die Leistungsfähigkeit der Barriere. Künftige Weiterentwicklungen sind zu erwarten, da sich bisher kein überzeugendes einheitliches Vorgehen herausgebildet hat.

4.1.6 Unsicherheiten

Der Detaillierungsgrad von Kenntnissen über Aufbau, Eigenschaften und Performance der geologischen Barriere hängt sehr eng mit dem Fortschritt des Projekts zusammen. Insofern sind auch die Art, der Umfang und die Wertigkeit von Unsicherheiten eine Funktion des Projektfortschritts und seiner einzelnen Stufen (Erkundung, Eignungsuntersuchung, etc.). Ohne ober- und untertägige Erkundung ist das Wissen über die Ei-

genschaften und das Verhalten der geologischen Barriere naturgemäß geringer und die damit verbunden Unsicherheiten sind größer als im Laufe oder nach Abschluss dieser Arbeiten. Die Kenntnis über die geologische Barriere ist auch in fortgeschrittenen Erkundungs- und Realisierungsverfahren noch mit Unsicherheiten behaftet, die möglichen Auswirkungen dieser Unsicherheiten sind jedoch begrenzt und einschätzbar. Im Folgenden werden die verschiedenen Unsicherheiten der Kenntnisse über die geologische Barriere näher beschrieben und eingeordnet.

Die Wirksamkeit der geologischen Barriere ist bei der Sicherheitsbewertung über sehr lange Zeiträume zu beurteilen. Die Vorhersage über solche langen Zeiträume, die geologische Langzeitentwicklung, ist mit Unsicherheiten behaftet /ALB 04/, die durch verschiedene Erkundungsmaßnahmen und Forschungsaufwand verringert werden kann. Für verbleibende Unsicherheiten ist zu entscheiden, ob und wie diese abgedeckt werden sollen. Das Ausmaß an akzeptabler Restunsicherheit über die langfristige Wirksamkeit der geologischen Barriere bestimmt sich aus der jeweils ungünstigsten Auswirkung, die mit der Unsicherheit verbunden wäre. Dabei ist zwischen wirtsgesteinspezifischen und wirtsgesteinübergreifenden Aspekten zu differenzieren.

Vom Wirtsgestein unabhängige Unsicherheiten

Aspekte der geologischen Langzeitentwicklung, die die Wirksamkeit der geologischen Barriere zentral beeinflussen und die für alle Wirtsgesteine in vergleichbarer Weise wichtig sind, sind:

- langfristige Hebung bzw. Senkung: Hebungen und Senkungen gehen in die Sicherheitsbewertung für Endlager ein, da sie Einfluss auf die Stabilität und Mächtigkeit der geologischen Barriere nehmen können. Zur Reduzierung von Unsicherheiten dieser Größe ist ein ausreichendes Verständnis über die Ursachen und der wirksamen Mechanismen erforderlich, die den heutigen, den in der (geologischen) Vergangenheit sowie den künftig zu erwartenden Raten zugrunde liegen. Die Bestimmung heutiger Raten ist dabei durch einfache Messungen zugänglich (zur Verbesserung der Aussagekraft vorzugsweise über mehrere Jahre bzw. Jahrzehnte), während die Bestimmung der Raten in der Vergangenheit spezielle geologische bzw. geophysikalische Untersuchungen erfordert (z. B. Untersuchungen über den Verlauf der Erosion). Die den heute gemessenen und für die Vergangenheit beobachtbaren Raten zugrunde liegenden Mechanismen setzen ein eingehendes Verständnis der tektonischen Verhältnisse am Standort voraus. Die verbleibenden

Unsicherheiten über die Langzeitentwicklung von Hebungen und Senkungen lassen sich mit diesen Methoden an Standorten mit guter Prognostizierbarkeit soweit eingrenzen, dass ihr Einfluss auf die Wirksamkeit der geologischen Barriere ausreichend verstanden wird und bei der Sicherheitsbewertung berücksichtigt werden kann. Je nach den geologischen Bedingungen, den ermittelten Raten und ihrer verbleibenden Restunsicherheit gehen Hebung bzw. Senkung entweder als eigenständig zu untersuchendes Szenario, oder in die Mächtigkeit des Deckgebirges oder, im günstigsten Fall, gar nicht in die Sicherheitsbetrachtungen ein.

- Vulkanismus: Die Auswirkungen vulkanischer Eruptionen auf die Wirksamkeit der geologischen Barriere gehören zu den weniger wahrscheinlichen bis unwahrscheinlichen Ereignissen (Gebiete mit höher wahrscheinlichen vulkanischen Ereignissen scheiden in der Regel als grundsätzlich ungeeignet aus). Für die Beurteilung der Wirksamkeit der geologischen Barriere ist daher die Entscheidung notwendig, ob und wie wahrscheinlich solche Ereignisse am gegebenen Standort sind. Ließen sich solche Ereignisse nicht völlig ausschließen, müssten die Konsequenzen in einem entsprechend abdeckenden Szenario betrachtet werden. Unsicherheiten bei der Einschätzung gehen daher bei einer deterministischen Sicherheitsbewertung lediglich in die Entscheidung über den zu betrachtenden Szenariensatz ein, weitere Auswirkungen hat die Unsicherheit dann nicht.
- Tektonische Langzeitentwicklung: Die tektonische Langzeitentwicklung beeinflusst in vielfacher Hinsicht die Wirksamkeit der geologischen Barriere. Zu den möglichen Mechanismen zählen die Art, Häufigkeit und Schwere von Erdbeben in der Nachbetriebsphase, die Reaktivierung inaktiver oder die Neubildung von geologischen Störungen oder auch die Beeinflussung von Hebungs- bzw. Senkungsraten (siehe oben), Unsicherheiten bei der Einschätzung der tektonischen Langzeitentwicklung an einem Standort wirken sich daher überwiegend auf den notwendigen Set an zu betrachtenden Szenarien aus, gehen aber in einzelnen Fällen auch in die Parametersätze bei mehreren Szenarien ein (z. B. bei der Festlegung, ob und wie viele Abfallbehälter bei einem Erdbebenereignis als beschädigt angenommen werden müssen). Unsicherheiten bei der Einschätzung der tektonischen Langzeitentwicklung sind daher durch entsprechende Gestaltung des Szenariensets und der Szenarien abdeckbar.
- Klima: Die Einschätzung über die künftigen klimatischen Bedingungen geht ebenfalls vielfältig in die Beurteilung der Wirksamkeit der geologischen Barriere ein, aber nicht unbedingt auch in die Wirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbe-

reichs. Teils sind wirtsgesteinsspezifische Mechanismen zu berücksichtigen (siehe unten), teils sind die Wirkmechanismen aber auch vom Wirtsgestein unabhängig (z. B. durch relevante Veränderungen der Hydrologie im Deckgebirge). Klimaveränderungen treten im Isolationszeitraum in jedem Fall ein, die Bandbreite der künftigen Klimaentwicklung ist daher bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit zu berücksichtigen. Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Klimaentwicklung müssen daher bei der Festlegung von Szenarien für den Referenzfall abgedeckt sein. In der internationalen Praxis werden weniger wahrscheinliche Extrema der Klimaentwicklung oft auch als „What-if“-Szenarien in die Sicherheitsbetrachtung mit einbezogen, um die Sensitivität zu testen.

Insgesamt ergibt sich, dass vom Wirtsgestein unabhängige Unsicherheiten über die Wirksamkeit der geologischen Barriere vor allem in die Szenarienauswahl eingehen und sich in der Definition des Referenzfalls oder als Varianten niederschlagen. Diese Art von Unsicherheiten geht nicht direkt in die Sicherheitsberechnungen ein, die Unsicherheiten haben daher für das erhaltene Endergebnis praktisch keine Auswirkungen. Die Unsicherheiten verringern oder vergrößern sich nach Art und Ausmaß nach abgeschlossener Erkundung auch nicht mehr wesentlich, so dass es unerheblich ist, über welchen Zeitraum (10.000, 100.000 oder 1 Mio. Jahre) sich die diesbezüglichen Betrachtungen erstrecken.

Wirtsgesteinsabhängige Unsicherheiten

Wirtsgesteinsspezifische Unsicherheiten mit Bezug auf die Wirksamkeit der geologischen Barriere sind beispielsweise:

- bei Salzdiapiren: Unsicherheiten in Bezug auf die Subrosion, den verstärkten Salzaufstieg in Klimaphasen mit Eisüberdeckung, die Erstreckung hydraulisch durchlässigerer Gesteinsschichten (z. B. Anhydrit, Salzton) und Klüfte,
- bei Ton und Tonstein: Unsicherheiten bei Diffusionsraten, langfristiger thermischer Einwirkung und bezüglich der Homogenität (Klüfte, Störungen),
- bei Granit: Unsicherheiten bei Kluftarten und –umfängen, der Bandbreite hydrologischer Eigenschaften des gesamten Gesteinsverbunds, Art und Charakteristika seismischer Einwirkungen auf das Wirtsgestein.

Die Eingrenzung von Art und Ausmaß an Unsicherheiten dieser verschiedenen Arten erfolgt im Rahmen meist sehr standortspezifischer Untersuchungen und mit auf die

Fragestellung sehr genau zugeschnittenen Untersuchungsmethoden. So wurde die Frage der Subrosionsraten am Salzstock Gorleben intensiv untersucht und die Bandbreite für vergangene und heutige Verhältnisse ermittelt /BGR 07/. Mit den Untersuchungen liegen auch begründete Aussagen über die Auswirkungen von Eiszeiten auf die Subrosionsrate vor.

Für die Sicherheitsanalysen im Granit bestehen die folgenden typischen Unsicherheiten mit teilweise widersprechenden Bewertungen. In der schwedischen Sicherheitsanalyse SR 97 werden Unsicherheiten bei der Charakterisierung der Strömungsverhältnisse als wesentliche Quellen für Unsicherheiten gewertet, während die Unsicherheiten in Bezug auf die Sorption und Matrixdiffusion eine geringere Bedeutung haben /SKB 99a/. In der japanischen Analyse heißt es jedoch, dass die Matrixdiffusion einen entscheidenden Charakter hat /NAG 02a/. Um die Unsicherheiten zu reduzieren, wird in der finnischen Studie TILA-99 vorgeschlagen, die Strömungsverhältnisse von salinaren Lösungen in Küstennähe sowie die Löslichkeit von Radionukliden unter den gegebenen Bedingungen und die Diffusionskonstanten für einige Kationen näher zu bestimmen, so dass die sehr konservativen Schätzungen, die zur Zeit verwendet werden, durch realistischere Bandbreiten ersetzt werden können /TIL 99/.

Im Unterschied zu den eingangs beschriebenen Unsicherheiten, die sich ausschließlich auf die Modellbildung auswirken, sind bei wirtsgesteinsspezifischen Unsicherheiten auch Unsicherheiten einzelner Parameter zu berücksichtigen. Als Beispiele seien Unsicherheiten bei den Diffusionsraten genannt, die bei Ton und Tonstein eine zentrale Rolle spielen. Diese Messungen sind wegen grundsätzlich begrenzter Messgenauigkeit nur mit relativ großen Fehlerbandbreiten bekannt. Solche Parameterungenauigkeiten sind praktisch durch die Entwicklung und Anwendung verfeinerter Untersuchungsmethoden reduzierbar und somit vom Forschungsfortschritt abhängig. Die entsprechenden Unsicherheiten sind vom Betrachtungszeitraum unabhängig, eine Verlängerung der Nachweisdauer ist daher nicht mit größeren Unsicherheiten verbunden.

Für den Umgang mit solchen Parameterungenauigkeiten wurden in der Sicherheitsanalyse für Endlager mathematisch begründete Methoden entwickelt (siehe unten). So ist zum Beispiel die Diffusionsgeschwindigkeit eines Radionuklids durch eine bestimmte Schichtdicke an Tonstein bestimmter Qualität von der angesetzten Diffusionskonstante abhängig. Einer ungenauen Bestimmbarkeit dieser Konstante wird in der Sicherheitsanalyse dadurch begegnet, dass ein wahrscheinlicher Wert und eingeschätzte Unter- und Obergrenzen dieses Parameters angesetzt werden. Die Verteilung des Ra-

dionuklids in der geologischen Barriere zu einem bestimmten Zeitpunkt, und folglich der resultierende Dosiswert, sind für diese Parameterbandbreite ermittelbar. Die Unsicherheit des Parameters wird mit zunehmender Zeit weder größer noch kleiner, die Auswirkungen dieser Unsicherheit in den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse wird ebenfalls nicht variieren.

Eine weitere Kategorie von Unsicherheiten bei der Wirksamkeit der geologischen Barriere betrifft z. B. die Inhomogenität realer geologischer Objekte. So folgt der geologische Schichtenaufbau teilweise bekannten Regeln, kann aber auch über Bandbreiten variieren. Der Schichtaufbau ist nur über begrenzte Bereiche direkt der Erkundung zugänglich (z. B. im Bereich von Bohrungen, von Hohlräumen der untertägigen Erkundung aus). Entferntere Bereiche müssen mit geeigneten geophysikalischen Methoden erkundet werden, deren Reichweite und Aussagequalität methoden- und wirtsgesteinspezifisch begrenzt ist. Die Kombination aus der Anwendung von Erkundungsmethoden und von wirtsgesteinsspezifischem Erfahrungswissen über den Aufbau und die Eigenschaften der geologischen Schichten erreicht dabei eine bestimmte Aussagesicherheit. Die verbleibende Unsicherheit ist vom Erkundungsaufwand und vom Erkundungsfortschritt abhängig, die Unsicherheiten bleiben innerhalb einer gewissen Bandbreite. Unsicherheiten dieser Art sind ebenfalls vom Betrachtungszeitraum der Langzeitsicherheitsanalyse unabhängig, sie werden daher bei einem längeren Betrachtungszeitraum weder verringert noch vergrößert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Art und Ausmaß der wirtsgesteinsspezifischen Unsicherheiten überwiegend vom Erkundungsfortschritt abhängen. Die Unsicherheiten sind zu einem bestimmten Zeitpunkt (Abschluss der Erkundung, Erteilung der Zulassung für die Errichtung) auf einem bestimmten Niveau angekommen; ihr Niveau, ihr Charakter und die Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage nehmen in keinem Fall mit verlängertem Prognosezeitraum der Sicherheitsanalyse zu.

Unsicherheiten bei der Modellierung der geologischen Barriere

Wegen des z. T. komplexen geologischen Aufbaus von geologischen Formationen und den in ihnen ablaufenden Prozessen müssen z. B. in den Modellrechnungen vereinfachte Annahmen über diese getroffen werden. Solche Vereinfachungen finden z. B. bei der Charakterisierung der geologischen Barriere statt, da die Genauigkeit, mit der sie erkundet wird, einerseits von dem messtechnischen Untersuchungsaufwand ab-

hängt und andererseits für eine gute Handhabung unter Umständen Schichten mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst werden müssen.

Eine weitere Quelle für Unsicherheiten liegt darin, dass viele Prozesse, die in der geologischen Barriere ablaufen, zum einen im Labor getestet werden und damit nicht unter realen Bedingungen. Zum anderen können die betrachteten Zeiträume bei solchen Versuchen nicht den realen Einlagerungszeiten entsprechen. Upscaling, wie das Schließen von kurzen Untersuchungszeiträumen auf lange Zeiten oder das Schließen von stichprobenartigen Erkundungsergebnissen auf den Aufbau der gesamten geologischen Schicht, beinhaltet immer auch eine sorgfältige Abwägung der damit verbundenen Unsicherheit. So lassen sich das langfristige Verhalten der geologischen Barriere und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten geologischer Prozesse zwar abschätzen, aber diese Abschätzung beinhaltet immer Unsicherheiten.

Weiterhin sind die realen Randbedingungen in der geologischen Barriere nur bedingt bekannt und können sich zudem räumlich und zeitlich immer wieder ändern. Somit werden die in der geologischen Barriere ablaufenden Prozesse unter Umständen nicht korrekt beschrieben und gegebenenfalls statt findende sicherheitsrelevante Wechselwirkungen möglicherweise nicht ausreichend oder überhaupt nicht in den Sicherheitsanalysen berücksichtigt.

Es kommt ferner hinzu, dass einzelne Prozesse in der geologischen Barriere bei der Sicherheitsanalyse vergessen sein könnten oder in ihrer Wirkung unterschätzt wurden.

Um Unsicherheiten dieser Art (bei der Modellumsetzung, ungenügend berücksichtigte Einwirkungen, unbekannt oder unterschätzte Prozesse) zu vermeiden bzw. ihre Auswirkungen auf die Aussagesicherheit zu reduzieren, ist eine systematische Analyse der geologischen Barriere nach allen denkbaren Prozessen hin unabdingbar. „Systematische Analyse“ bedeutet dabei, dass in einem ersten Schritt auch „offenkundig“ unwichtige Prozesse auf ihr Potential hin untersucht und bewertet werden. Es bedarf auf jeden Fall einer nachvollziehbaren Begründung, wenn im Modell auf die Berücksichtigung bestimmter Prozesse verzichtet wird.

4.1.7 Umgang mit Unsicherheiten in den Langzeitsicherheitsanalysen

In den Sicherheitsanalysen müssen alle Unsicherheiten, die gegebenenfalls zu einer Reduzierung der Barrierewirksamkeit führen, hinreichend berücksichtigt werden. Ab-

hängig von der Art der Unsicherheit gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie mit diesen Unsicherheiten in den Langzeitsicherheitsanalysen umgegangen wird. Unsicherheiten, die wegen ihres grundlegenden Charakters in die Definition von Szenarien und deren Varianten (z. B. in „What-If-Cases“) eingehen, werden hier nicht weiter behandelt, da sie durch die Szenarien abgedeckt werden.

Unsicherheiten bei Parametern sind die bekannteste Art. Der Umgang variiert etwas, je nachdem ob die Unsicherheit des Parameters lediglich durch Messungenauigkeiten oder durch Variation beim Objekt selbst herrührt. Bei beiden Arten von Parameterunsicherheiten besteht die erste Möglichkeit darin, den Parameter durch verstärkte Forschung (Messungenauigkeiten) oder eingehendere Erkundung (Variation beim Objekt) genauer zu bestimmen und die Unsicherheiten damit zu reduzieren.

Ein übliches Vorgehen ist, dass für ungenaue Parameter in den Modellberechnungen konservative Annahmen getroffen werden. Das heißt, ein Parameter mit ungünstigen Auswirkungen auf die Barrierewirksamkeit wird bewusst überschätzt, z. T. um ein Mehrfaches. In neueren Sicherheitsanalysen wird ein sogenannter realistisch-konservativer Ansatz gewählt. Das bedeutet, dass die Parameter zwar weiterhin überschätzt werden, dass aber keine unrealistischen Annahmen getroffen werden, die aufgrund des allgemeinen naturwissenschaftlichen Verständnisses auszuschließen sind.

Ein weiterer Ansatz, Parameter-Unsicherheiten in den Langzeitsicherheitsanalysen hinreichend zu berücksichtigen, ist die Verwendung von Bandbreiten in den Berechnungen. Ein Parameter geht also wechselweise mit seinem Minimalwert und mit seinem Maximalwert in die Berechnung ein, während alle anderen „unsicheren“ Parameter auf einen als „realistisch“ eingeschätzten Wert gesetzt werden. Man erhält so ein optimistisch und ein pessimistisch geschätztes Ergebnis und kann so den Einfluss der Bandbreite des Parameters auf das Endergebnis näher bestimmen. Auf diese Weise kann die Relevanz dieses Parameters ermittelt und entschieden werden, ob eine Reduzierung seiner Unsicherheitsbandbreite lohnend erscheint oder von vernachlässigbarer Bedeutung ist.

Da es sich bei Langzeitsicherheitsanalysen um mehrfach gekoppelte Systeme handelt, ist der Einfluss eines Parameters nicht immer einfach linear. Um Kombinationen von zwei oder mehr Parametern zu identifizieren, deren Wirkung überproportional, also mit mehr als nur ihrem jeweiligen Eigengewicht, in das Endergebnis eingeht, können alle verwendeten Parameter mittels Zufallsauswahl aus ihrer jeweils sinnvollen Bandbreite

eingesetzt und getestet werden. Wird dieses Verfahren oft wiederholt, können sensitive Kombinationen von Parametern identifiziert werden.

Hat ein Parameter eine günstige Wirkung auf die Barrierefunktion, ist aber nur mit großen Unsicherheiten zu bestimmen, dann wird in den Langzeitsicherheitsanalysen oft von dieser günstigen Wirkung kein Kredit genommen. Mit diesem Vorgehen behält man sich sogenannte Sicherheitsreserven vor. Beispiele für solche bewusst nicht in Anspruch genommenen Sicherheitsreserven, die in heutigen Sicherheitsanalysen vorliegen, sind z.B.:

- bei Löslichkeiten im Nahfeld-Modell: die Annahme vollständiger Löslichkeit von bestimmten Elementen (z. B. Uran, Plutonium) oder des gesamten Inventars,
- bei Migrationsmodellen: die Unterstellung, es läge unter allen Umständen die jeweils mobilste chemische Form eines Radionuklids vor (z. B. Tc-99 als Technetat, U-238 in sechswertiger Form, keine Sorption und Reduktion bei Se-79) oder Cs-135 werde in Tonstein nicht sorbiert, obwohl dies zwar aus naheliegenden Gründen nicht so sein kann, der tatsächliche Nachweis aber nur sehr aufwändig zu führen wäre,
- bei Ton: die Vernachlässigung der Barrierewirksamkeit von Nebengesteinen, oder
- allgemein: die Nichtberücksichtigung von Verdünnungsprozessen in den das Endlager überdeckenden Aquiferen /NAG 02a/.

Ein Teil dieser Annahmen deckt Unsicherheiten bei Modellen ab, die zur Vereinfachung und Reduzierung des Rechenaufwands getroffen wurden. Eine Verbesserung und Verfeinerung des Rechenmodells hat in diesen Fällen eine Verringerung der Dosiswerte zur Folge.

In den neueren Sicherheitsanalysen werden sowohl deterministische als auch probabilistische Berechnungen durchgeführt. Das bedeutet, dass zum einen Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines bestimmten Ereignisses oder Prozesses berücksichtigt werden. Zum anderen können Parameter, die sich nicht eindeutig bestimmen lassen, in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung in die Sicherheitsanalysen eingehen. Bei /PAG 88a/ geht z.B. die Subrosionsrate als Wahrscheinlichkeitsverteilung in die Berechnungen ein, da bei der Bestimmung der Subrosionsrate große Unsicherheiten bestanden und diese oft nur grob abgeschätzt wurden. Mit fortgeschrittenerer Erkundung

kann diese Verteilung weiter eingengt werden. Probabilistische Untersuchungen eignen sich im Unterschied zu deterministischen Untersuchungen besser für die Identifizierung der jeweiligen sensitiven Ereignisse, Prozesse und Szenarienschritte eines Gesamtsystems.

Insgesamt lassen sich Unsicherheiten bei der geologischen Barriere

- durch Erkundung und Beobachtungen reduzieren,
- durch geeignete Analysearten in ihren Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage qualifizieren, und
- durch Methoden der Sicherheitsbewertung bewerten, welches Ausmaß an Unsicherheit bei der geologischen Barriere tolerabel oder intolerabel ist.

4.2 Geotechnische Barrieren

Künstliche Barrieren, die durch technisch-konstruktive Maßnahmen in das geologische System eingebracht werden und den Eingriff in das geologische System kompensieren, werden als geotechnische Barrieren bezeichnet. Unter geotechnischer Barriere sollen hier ausdrücklich nicht Korrekturmaßnahmen verstanden werden, mit denen eine ungenügende geologische Barriere nachqualifiziert wird.

Art und Beschaffenheit der geotechnischen Barrieren sind in starkem Maße abhängig vom Wirtsgestein. Zu den geotechnischen Barrieren zählen Schachtverschlüsse, Bohrloch- und Streckenverschlüsse, Dämme sowie Bentonitbuffer. Der in offene Hohlräume eingebrachte Versatz hat zumeist vorrangig stabilisierende Funktion, behindert jedoch auch die Ausbreitung von Radionukliden und kann daher ebenfalls zu den geotechnischen Barrieren gerechnet werden.

Im Folgenden werden die geotechnischen Barrieren der verschiedenen Referenzkonzepte aus sicherheitsanalytischer Sicht kurz beschrieben.

4.2.1 Eigenschaften der geotechnischen Barrieren beim Referenzkonzept Steinsalz

Versatz

Im Steinsalz werden die Abfallbehälter in Bohrlöcher oder Einlagerungsstrecken eingebracht, die anschließend mit Salzgrus versetzt werden. Der Salzgrus hat anfänglich eine hohe Permeabilität und stellt damit keine wirkliche Barriere dar, jedoch wird er unter dem Einfluss des Gebirgsdrucks und der Konvergenz kompaktiert. Die Kompaktionsgeschwindigkeit und die Endporosität hängen von der Salzqualität, der Temperatur sowie vom inneren Gegendruck aufgrund von Gas oder Flüssigkeit in den Porenräumen ab. Im Idealfall kann der Versatz bereits innerhalb weniger Jahrzehnte nahezu die hydraulischen Eigenschaften von kompaktem Steinsalz annehmen und damit zu einer praktisch undurchlässigen Barriere werden. Kommt es jedoch zu einem frühen Flüssigkeitszutritt oder Gasdruckaufbau, dann setzt diese Entwicklung nicht ein oder kommt vorzeitig zum Stillstand, so dass eine Barrierenwirkung des Versatzes nicht mehr vorausgesetzt werden kann.

Verschlüsse

Die Bohrlöcher und Einlagerungsstrecken werden nach der Verfüllung verschlossen. Dafür werden Materialien verwendet, die von Anfang an eine sehr geringe Permeabilität haben, z.B. Formsteine aus Steinsalz oder vorkompaktiertem Salzgrus oder Salzbeton. Als zusätzliche Dichtelemente können Schichten aus Asphalt oder Bitumen eingebracht werden. Dadurch entstehen zuverlässige Barrieren, die von Beginn an wirksam sind.

Dämme

Unter Umständen werden innerhalb des Grubengebäudes weitere Abdichtbauwerke vorgesehen, um Grubenteile frühzeitig während des Einlagerungsbetriebs oder vor dem Verschluss des gesamten Endlagers abzutrennen und die Ausbreitung von Schadstoffen z.B. zwischen verschiedenen Grubenteilen zu behindern. Für solche Dämme gilt dasselbe wie für die Bohrloch- und Streckenverschlüsse.

Schachtverschluss

Da der Zugangsschacht bis zur Tagesoberfläche reicht, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ebenso durchörtert wie höher durchlässige Schichten des Deckgebirges, ist auf den Schachtverschluss besondere Sorgfalt zu verwenden, damit eventuell mobilisierte Radionuklide nicht hierüber einen schnellen Weg in die Biosphäre finden. Insofern hat der Schachtverschluss im Barrierensystem keine zusätzliche, die Sicherheit erhöhende Funktion. Er soll vielmehr die unvermeidliche Verletzung der Integrität der geologischen Barriere reparieren und sollte daher mindestens deren Eigenschaften aufweisen.

Es gibt ein- und mehrkomponentige Schachtverschlusskonzepte. Bei mehrkomponentigen Systemen dienen kurzfristig abdichtende Schichten aus Bitumen o. ä. zur Herstellung einer sofortigen Dichtigkeit, während kompaktierende oder quellfähige Komponenten aus Salz bzw. Bentonit die dauerhafte Dichtigkeit sicherstellen.

4.2.2 Eigenschaften geotechnischer Barrieren beim Referenzkonzept Tonstein

Bentonitbuffer

In einigen Konzepten ist eine Ummantelung der Behälter mit Bentonit vorgesehen. Das ist ein Ton mit hoher Quellfähigkeit und guter chemischer Pufferwirkung. Bei Kontakt mit Wasser entsteht ein so hoher Quelldruck, dass nahezu alle Resthohlräume rund um den Behälter verschlossen werden und zusätzlich auch die Durchlässigkeit der Auflockerungszone um den Behälterhohlraum verringert wird. Dadurch bildet sich eine sehr dichte und rückhaltefähige Barriere aus, die von Schadstoffen praktisch nur diffusiv und sehr langsam durchdrungen werden kann.

Versatz

Für ein Endlager in einer Tonformation ist ebenso wie im Steinsalz die Einbringung der Behälter in Bohrlöcher oder Einlagerungsstrecken vorgesehen. Als Versatzmaterial wird dabei z.B. ein Ton-Sand-Gemisch verwendet. Im Gegensatz zum Steinsalz gibt es im Tonstein keine nennenswerte Konvergenz, so dass mit äußerer Kompaktion des Versatzes nicht zu rechnen ist. Wird jedoch ein quellfähiger Ton verwendet, so kommt es bei Wasserzutritt zu einer inneren Kompaktion durch Quellung und damit zur Ab-

nahme der hydraulischen Leitfähigkeit. Die Bedeutung des Versatzes als Barriere ist beim Tonkonzept allerdings vergleichsweise gering.

Schachtverschluss

Für den Schachtverschluss gilt weitgehend das gleiche wie beim Salzkonzept. Da der Schacht die beim Tonkonzept besonders wichtige geologische Barriere überbrückt, muss der Verschluss sehr zuverlässig sein und die Eigenschaften des ungestörten Wirtsgesteins erreichen oder gar übertreffen.

4.2.3 Eigenschaften geotechnischer Barrieren beim Referenzkonzept Granit

Bentonitbuffer

Beim Granitkonzept ist grundsätzlich eine Ummantelung der Behälter mit Bentonit vorgesehen. Dieser Barriere kommt eine große Bedeutung zu, da das Wirtsgestein Granit als geologische Barriere eine geringere Wirksamkeit besitzt als andere Gesteine. Der Zutritt von Wasser stellt beim Granitkonzept die normale, zu erwartende Entwicklung dar; insofern ist von der vollständigen Quellung des Bentonits und damit von der Ausbildung einer extrem dichten Barriere auszugehen, bevor das Wasser die Abfälle erreicht. Schadstoffe können dann nur noch durch sehr langsame Diffusion über den Buffer hinweg in die Granitformation gelangen.

Der Bentonitbuffer sorgt ferner für eine chemische Pufferung, senkt die Korrosionsrate des Behältermaterials und erhöht dessen Langzeitbeständigkeit.

Schachtverschluss

Wie beim Salz- und Tonkonzept darf der Schachtverschluss höchstens die hydraulische Leitfähigkeit des Wirtsgesteins haben, um als Wegsamkeit für Radionuklide außer Acht bleiben zu können. Da beim Granit im Allgemeinen vom Vorhandensein von Klüften ausgegangen wird, genügt es, wenn die hydraulische Leitfähigkeit eines durchgängigen Kluftsystems nicht überschritten wird.

4.2.4 Funktionsweise und Charakterisierung geotechnischer Barrieren

Geotechnische Barrieren sollen einerseits den Durchfluss von Flüssigkeit und Gas behindern sowie andererseits Schadstoffe durch Sorption chemisch binden. Der Strömungswiderstand bewirkt eine Verlangsamung des Fluidstroms und trägt somit zur Verzögerung der Radionuklidausbreitung bei. Die Sorption bewirkt eine zusätzliche Transportverzögerung, weil im Sorptionsgleichgewicht immer nur ein gewisser Anteil der Schadstoffteilchen gleichzeitig beweglich ist, während die übrigen festgehalten werden. Neben der Verzögerung bewirkt die Sorption aber auch eine Herabsetzung der Schadstoffkonzentration in Lösung, also eine Verdünnung. Die Funktionen der geotechnischen Barrieren liegen somit in den Bereichen Verzögern und Verdünnen. Im Wirtsgestein Salz können geotechnische Barrieren wie Bohrlochverschlüsse bei günstigen Verhältnissen durch Kompaktion mit der Zeit die Eigenschaften des umgebenden Steinsalzes annehmen und damit eine vollständige und endgültige Einkapselung der Abfälle bewirken. Durch diesen Effekt können geotechnische Barrieren im Salz sogar zum Verhindern von Schadstofffreisetzung beitragen.

Die Funktionalität geotechnischer Barrieren muss über sehr lange Zeiträume sichergestellt bleiben. Sie sollten daher stets so ausgelegt werden, dass ihre Barrierenfunktion sich mit der Zeit möglichst verbessert, zumindest jedoch nicht nachlässt. Im Wirtsgestein Salz wird dies durch die natürliche Hohlraumkonvergenz und die Kompaktion des Versatzmaterials erreicht. Es ist allerdings dafür Sorge zu tragen, dass es auch unter ungünstigen Bedingungen nicht zu einer Destabilisierung der eingesetzten Materialien, z. B. durch chemische Umlösevorgänge, kommen kann. In den Wirtsgesteinen Tonstein und Granit, in einigen Konzepten aber auch im Steinsalz, werden quellfähige Tone wie Bentonit als Material für geotechnische Barrieren eingesetzt. Dabei wird die zeitliche Verbesserung der Barrierenfunktion durch die Quellung beim Kontakt mit Wasser oder salzhaltigen Lösungen sichergestellt.

Bei der Langzeitsicherheitsanalyse werden geotechnische Barrieren entsprechend ihrer Funktionsweise durch fluidabhängige Parameter wie den Strömungswiderstand sowie nuklidabhängige Parameter wie Rückhaltevermögen oder Transportzeit charakterisiert. Diese Parameter können sich im Zeitverlauf verändern.

4.2.5 Bewertung geotechnischer Barrieren durch Performance-Indikatoren

Zur Bewertung der Funktion geotechnischer Barrieren innerhalb des Gesamtsystems sind geeignete Performance-Indikatoren erforderlich. Die Wirksamkeit einer Barriere kann gegenüber verschiedenen Radionukliden sehr unterschiedlich sein, daher sollten für die Detailbewertung einzelner Barrieren immer nuklidspezifische Performance-Indikatoren betrachtet werden.

Da die wichtigsten Aufgaben der geotechnischen Barrieren Transportverzögerung und Schadstoffrückhaltung sind, liegt es nahe, sie durch Indikatoren zu bewerten, die genau diese Funktionen widerspiegeln. Es ist jedoch nicht immer einfach, die Barrierenfunktionen durch eindeutig definierte und aussagekräftige Rechengrößen zu beschreiben.

Zur Bewertung der Transportverzögerung kann man im Prinzip die nuklidspezifische Transportzeit durch die Barriere verwenden. Im Prinzip sind geotechnische Barrieren als Bauwerke im Vergleich zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich sehr viel kürzer, die Transportstrecke ist vergleichsweise minimal. Bei der Transportverzögerung handelt es sich um eine relativ schwierig zu definierende Größe. Zum einen weitet sich eine in die Barriere eintretende scharfe Konzentrationsfront durch Diffusion und Dispersion während des Transports auf. Die Schadstoffe verlassen somit die Barriere nicht zu einem eindeutigen Zeitpunkt, sondern über einen weiten zeitlichen Bereich hinweg (z.B. bei höher sorbierenden Radionukliden über mehrere 100.000 Jahre hinweg).

Als Alternative bietet sich die Möglichkeit, die Ausbreitung eines sehr kurzen Impulses zu rechnen und die Zeit bis zum Auftreten des Konzentrationsmaximums am Ausgang der Barriere als Transportzeit zu nehmen. Zum anderen ist es kaum möglich, Transportzeiten für Radionuklide zu bestimmen, die Zerfallsreihen angehören, weil solche Nuklide während des Transports auf- und abgebaut werden können. Wenn man diese Nuklide isoliert betrachtet, besteht die Gefahr, dass ihre Transportzeiten deutlich überschätzt werden, wenn sie tatsächlich aus schneller laufenden Müttern aufgebaut werden.

Die Schadstoffverzögerung, z. B. durch Sorption innerhalb des Barrierenmaterials, wirkt sich ebenfalls auf die Transportzeiten aus, bewirkt aber darüber hinaus auch eine Verminderung der Konzentration. Als Performance-Indikatoren kann man z. B. die gelösten Radionuklidkonzentrationen beiderseits der Barriere oder die Radionuklidströme

in die und aus der Barriere heraus miteinander vergleichen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Transportverzögerung eine nuklidabhängige Zeitverschiebung zwischen Eingang und Ausgang der Barriere erzeugt.

4.2.6 Unsicherheiten bei geotechnischen Barrieren

Bei der modellhaften Behandlung von geotechnischen Barrieren im Rahmen von langzeitsicherheitsanalytischen Rechnungen ist man auf stark vereinfachende Annahmen angewiesen. Dabei werden Parameter verwendet, die häufig eine Reihe von Materialeigenschaften pauschal zusammenfassen und allein schon dadurch zwangsläufig erheblichen modellbedingten Unsicherheiten unterliegen. Modellparameter werden im Allgemeinen aus Laborexperimenten abgeleitet und gegebenenfalls theoretisch auf In-situ-Verhältnisse übertragen. Aufgrund unzureichender Kenntnisse über die tatsächlichen Verhältnisse kommt es dadurch zu weiteren Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten sind vom epistemischen Typ, da sie aus Mangel an Wissen resultieren. Rein aleatorische, also aus physikalischen Zufallsprozessen entstehende Unsicherheiten treten kaum auf. Ein angemessener Umgang mit Unsicherheiten ist von entscheidender Bedeutung bei der sicherheitsbezogenen Bewertung von Barrieren. Die im Zusammenhang mit geotechnischen Barrieren bedeutendsten Unsicherheiten werden im Folgenden kurz angesprochen.

Das Material von Dämmen und Verschlüssen, also z.B. vorkompaktiertem Salzgrus oder Tongranulat, besitzt eine gewisse Restporosität. Diese wird sich im Allgemeinen mit fortschreitender Kompaktion oder Quellung verringern. Die physikalische Beschreibung dieser Vorgänge verwendet Parameter über das Kriech- oder Quellverhalten, die relativ zuverlässig aus Laborexperimenten abzuleiten sind. Jedoch bleiben Unsicherheiten bezüglich des Langzeitverhaltens, welches experimentell nicht zu erfassen ist. So bestehen z. B. Unklarheiten über die verbleibende Restporosität von Salzgrus unter In-situ-Bedingungen, kurz bevor oder nachdem der Kompaktionsprozess zum Stillstand gekommen ist.

Die Permeabilität des Materials der Abdichtungen hängt in empfindlicher Weise von seiner Porosität ab. Die Annahme einer eindeutigen Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung für ein bestimmtes Material ist bereits eine Vereinfachung, da die Permeabilität tatsächlich nicht allein durch die integrale Porosität, sondern z. B. auch durch die Orientierung von Korngrenzen beeinflusst wird, welche ihrerseits von anisotropen Ef-

fekten sowie von der Vorgeschichte abhängen kann. Im Modell wird jedoch üblicherweise eine empirische Potenzfunktion zur Beschreibung der Abhängigkeit der Permeabilität von der Porosität verwendet. Hierin liegt eine Modellunsicherheit. Die Modellparameter ihrerseits werden aus Laborexperimenten abgeleitet, deren unter unterschiedlichen Bedingungen erzielte Ergebnisse relativ weite Streuungen aufweisen. Daher ist bei der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung mit erheblichen Unsicherheiten zu rechnen.

Von besonderer Bedeutung insbesondere bei Barrieren aus Tonmaterialien ist die Phase der Aufsättigung mit Wasser, weil die weiteren Prozessabläufe durch die Permeabilitätsentwicklung in der Frühphase beeinflusst werden können. Der Aufsättigungsvorgang wird durch vereinfachte Zwei-Phasen-Strömungsmodelle beschrieben, deren Parameter ebenfalls nur unzureichend genau bekannt und experimentell schwer bestimmbar sind. Hier liegen also ebenfalls erhebliche Modell- und Parameterunsicherheiten vor.

Eine weitere Quelle von Unsicherheiten resultiert aus der nicht auszuschließenden Möglichkeit einer technisch unvollkommenen Umsetzung des Konzepts. So besteht die Gefahr, dass sich in den Randbereichen von Abdichtungen Umläufigkeiten ausbilden, die den Strömungswiderstand zumindest in der Frühphase deutlich herabsetzen. Solche Unsicherheiten können in Modellrechnungen wie eine Unsicherheit der Permeabilität behandelt werden.

Insgesamt sind sowohl die Arten an Unsicherheiten als auch deren Zunahme bei der Langfristigkeit von Anforderungen im Vergleich zur geologischen Barriere beachtlich. Der Qualifizierung solcher Barrieren kommt in Langzeitsicherheitsnachweisen daher erhöhte Beachtung zu.

4.3 Technische Barrieren

Künstliche Barrieren, die außerhalb des geologischen Systems erstellt werden und unabhängig von diesem wirken, werden als technische Barrieren bezeichnet. Sie sind eigenständige Barrieren und gleichen keine Eingriffe in das geologische System aus.

Hierzu zählen diejenigen Systemkomponenten, die die Konditionierung und Einkapselung der eigentlichen Abfälle betreffen, also die Abfallmatrix sowie alle Behälterkomponenten.

4.3.1 Eigenschaften technischer Barrieren

Im Unterschied zu den geotechnischen Barrieren hängt die Ausführung der technischen Barrieren nicht oder nur in geringem Maß von der Art des Wirtsgesteins ab. Sie hängen sehr vom Entsorgungskonzept ab, d.h. ob die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente vorgesehen ist oder Glaskokillen aus der Wiederaufarbeitung endzulagern sind. Im Folgenden wird daher nicht nach den Referenzkonzepten unterschieden, sondern auf die relevanten Unterschiede zwischen den Entsorgungskonzepten hingewiesen.

Abfallmatrix

Bei der direkten Endlagerung abgebrannter Brennelemente besteht die Abfallmatrix aus dem Material der Brennstäbe selbst. Diese bestehen aus einer Uranoxid-Keramik. Bei Lösungsangriffen widersteht die Keramik in gewissem Umfang der Auflösung und es ist vom angreifenden Lösungsvolumen und von der Einwirkungsdauer abhängig, in welchem Umfang die Keramik aufgelöst wird.

Hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden verglast, d.h. unter sehr hoher Temperatur mit Borosilikatglas-Fritte zu einem Glas verschmolzen, das in einem Stahlbehälter erstarrt. Dieses Material besitzt eine hohe chemische Widerstandsfähigkeit gegenüber Wässern und salzhaltigen Lösungen und korrodiert nur sehr langsam, da sich aus in Lösung gegangenen Silikat-Grundgerüst wieder Silikatschichten auf der Oberfläche abscheiden und diese gegen weiteren Angriff schützen. Weiterhin ist das Glas stabil gegen ionisierende Strahlung sowie gegen höhere Temperaturen. Allerdings hat es aufgrund der hohen Beladung mit teilweise in Glas nicht verteilbaren Spaltprodukten und aufgrund der Spannungen beim Abkühlvorgang Fehlstellen und Risse, die den Auslaugprozess im Vergleich zu einem reinen, nicht oder in geringerem Umfang mit Abfällen beladenen Borosilikatglas verstärken. In jedem Fall wird durch die Einbindung der Abfälle in Glas bei einem Wasserangriff eine gewisse Verzögerung der Radionuklidfreisetzung erreicht.

Abfallbehälter

Aufgabe der Abfallbehälter ist es, eine vollständige Einkapselung der Abfälle für einen bestimmten Zeitraum sicherzustellen. Der erforderliche Nachweiszeitraum ist vom Endlagerkonzept abhängig:

- Die Einkapselung innerhalb des Behälters muss in jedem Fall während des Betriebs des Endlagers und zur Sicherheit um einige Zeit darüber hinaus gewährleistet werden. Bei Rückholbarkeit schließt das den dafür festgelegten Zeitraum einschließlich entsprechender Sicherheitsmargen ein.
- Bei Endlagerkonzepten, bei denen die geologische Barriere keinen alleinigen ausreichenden Einschluss garantiert, ist die Dichtigkeit des Behälters darüber hinaus über bestimmte Zeiträume von zentraler Bedeutung (Beispiele: USA mit der Anforderung garantierter Dichtheit über 10.000 Jahre, Schweden mit perspektivischer Dichtigkeit der Kupferbehälter über 1 Mio. Jahre).
- Bei Endlagerkonzepten mit dem Schwerpunkt auf der geologischen Barriere ist der Beitrag des Behälters zur gesamten Langzeitsicherheit jedoch eher marginal. So wird im Falle der Lagerung in Tonstein in der Schweiz oder in Frankreich der Behälter zwar modelliert, aber Sensitivitätsanalysen zeigen, z. B. in /NAG 02c/, dass die zusätzliche Verzögerung praktisch keinen Dosiseffekt zur Folge hat. Eine Reihe von Radionukliden (wie z. B. Uran, Plutonium) verbleiben dabei in der Abfallmatrix und im Behälter, würden sich aber nach ihrer Freisetzung auch im Tonstein nicht nennenswert weit bewegen können.
- Bei Endlagerkonzepten in Steinsalz spielt die Frage der Langzeit-Dichtigkeit des Behälters eine noch geringere Rolle, weil dessen Rückhaltefunktion durch die Konvergenz des Lagerbereichs bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs übernommen wird und im Regelfall keinerlei Dosiseffekt resultiert, wenn dessen Wirksamkeit zu Null gesetzt würde.

Aufgrund der Vielfalt der Anforderungen existieren weltweit sehr unterschiedliche Behälterkonzeptionen, bei denen unterschiedliche Ziele und Perspektiven im Vordergrund stehen. Die Behälter könnten im Prinzip so ausgeführt werden, dass ein Behälterdefekt auch nach sehr langer Zeit praktisch ausgeschlossen bleibt, jedoch würde das einen sehr hohen technischen Aufwand erfordern und extrem hohe Kosten verursachen. Da dem Sicherheitsgewinn durch den Behälterabschluss bei einem zuverlässigen geologischen Einschluss aber kein Dosisminderungs-Effekt zugeordnet werden kann, ergäbe sich bei einer integrierten Betrachtung des gesamten Endlagersystems daraus kein Vorteil.

In Deutschland ist für abgebrannte Brennelemente die Verwendung von Edelstahlbehältern vorgesehen, die nur langsam korrodieren. Es wurden verschiedene, z.T. mehr-

komponentige Behältertypen entwickelt (Pollux, BSK), die sich bezüglich der Kosten, aber auch bezüglich der Eignung für Bohrloch- oder Streckenlagerung unterscheiden. Verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung werden in einfachen Stahlbehältern endgelagert, da die Rolle der Behälter als technische Barriere bei der Einlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung gegenüber der Glasmatrix von untergeordneter Bedeutung ist.

4.3.2 Funktionsweise und Charakterisierung technischer Barrieren

Technische Barrieren sollen eine möglichst weitgehende Einkapselung der Abfälle bewirken, zumindest aber die Freisetzung von Radionukliden um möglichst lange Zeiträume verzögern. Insofern fallen ihre Aufgaben in die Bereiche Verhindern und Verzögern. Der Übergang zwischen diesen beiden Aufgabenbereichen ist allerdings fließend, da eine extreme Verzögerung jeglicher Freisetzung praktisch einen vollständigen Einschluss bedeutet. Die Verzögerung wird durch möglichst geringe Korrosionsraten des Matrix- bzw. Behältermaterials erreicht. Zur Herabsetzung von Schadstoffkonzentrationen durch Verdünnungseffekte können technische Barrieren nicht beitragen.

Da die technischen Barrieren außerhalb des Endlagers in speziell dafür errichteten Anlagen hergestellt werden, kann von einer hohen Präzision der Ausführung und damit von einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit technischer Fehler wie Risse oder Materialinhomogenitäten ausgegangen werden.

Beim Kontakt des endgelagerten Behälters mit Wasser oder Lauge kommt es zu einem langsamen Korrosionsprozess, durch den die Stärke der Wandung allmählich abnimmt bis der Behälter mechanisch instabil wird und, bei Steinsalz als Wirtsgestein, unter dem Einfluss des Gebirgsdrucks zerstört wird. Es ist allerdings auch nicht auszuschließen, dass es schon früher durch Lochfraß zu einem lokal begrenzten Behälterdefekt kommt. Bei beiden Korrosionsmechanismen hat der Behälter auch nach dem Ausfallzeitpunkt im Allgemeinen noch eine die Freisetzung verzögernde Wirkung.

Erst wenn alle Behälterkomponenten defekt sind, gelangt die Abfallmatrix in direkten Kontakt mit Flüssigkeit und beginnt zu korrodieren. Im Gegensatz zur Behälterkorrosion werden dabei kontinuierlich Radionuklide freigesetzt, da diese gleichmäßig in der Matrix verteilt sind. Im Fall der Glas- und der Brennstoffmatrix läuft dieser Prozess aber sehr langsam ab. Im Allgemeinen bleibt ein gewisser Anteil des Inventars im System aus Behälter und Abfallmatrix dauerhaft gebunden.

Anders als bei den geotechnischen Barrieren nimmt die Wirksamkeit technischer Barrieren mit der Zeit ab, bzw. ist als zeitlich begrenzt anzusehen. Zur Charakterisierung der technischen Barrieren dienen in erster Linie Korrosionsraten, da die Korrosion sowohl für den Behälter als auch für die Abfallmatrix der geschwindigkeitsbestimmende Effekt ist. Bei den Behältern ist jedoch von einem nahezu instantanen Ausfall nach Ablauf einer bestimmten Zeit auszugehen; daher werden Behälter zumeist durch ihre Standzeit charakterisiert. Um der Möglichkeit Rechnung zu tragen, dass die einzelnen Behälter in einem Einlagerungsfeld unterschiedlich schnell korrodieren können und einige wenige vielleicht sogar aufgrund von Fabrikationsfehlern sehr früh ausfallen, wird im Allgemeinen mit Behälterausfallfunktionen gearbeitet.

4.3.3 Bewertung technischer Barrieren durch Performance-Indikatoren

Technische Barrieren sollen zum einen den Beginn der Freisetzung möglichst lange verzögern und zum anderen einen möglichst großen Anteil des Inventars chemisch oder physikalisch dauerhaft binden. Diese Wirkungen werden nicht oder nur zu einem geringen Teil durch radionuklidabhängige Effekte bestimmt, daher ist im Unterschied zu den geotechnischen Barrieren eine Betrachtung nuklidspezifischer Performance-Indikatoren im Allgemeinen weder notwendig noch sinnvoll.

Die Behälterstandzeit kann direkt als Performance-Indikator für den Behälter verwendet und z.B. mit den Transportzeiten durch andere Barrieren verglichen werden. Die Behälterstandzeit ist jedoch ein rein technischer Parameter und damit für eine Bewertung der Barriere im Gesamtsystem weniger geeignet, zumal sie nichts über den tatsächlich freigesetzten Inventaranteil aussagt.

Für eine Gesamtbewertung der Rückhaltewirkung einer technischen Barriere aufgrund von Verzögerung und Zerfall einerseits sowie physikalisch-chemischer Effekte andererseits wird ein Indikator benötigt, der die Schadstofffreisetzung quantitativ erfasst. Zu diesem Zweck kann z.B. das aus der Abfallmatrix bzw. dem Behälter freigesetzte Radionuklidinventar mit dem ursprünglich darin befindlichen verglichen werden. Die zeitliche Entwicklung dieses Verhältnisses beginnt bei null und steigt ab dem Zeitpunkt des Barrierenausfalls an. Je später dieser Zeitpunkt liegt, desto geringer fällt aufgrund des radioaktiven Zerfalls der Anstieg aus. Dieser Indikator berücksichtigt alle Wirkungen der technischen Barriere. Er hat allerdings den Nachteil, dass er auch durch den Zerfall nach der Freisetzung aus der technischen Barriere beeinflusst wird und damit

Wirkungen wiedergibt, die nicht der untersuchten Barriere zuzuschreiben sind. Um dies zu vermeiden, kann anstelle des tatsächlichen Inventars außerhalb der Barriere der zeitlich integrierte Ausstrom verwendet werden. Wenn diese Größe auf das Anfangsinventar normiert wird, erreicht sie in der Zeitentwicklung letztlich einen asymptotischen Wert, der zeigt, wie hoch die Gesamtfreisetzung im Verhältnis zum Anfangsinventar ist.

4.3.4 Unsicherheiten bei technischen Barrieren

Technische Barrieren unterliegen, da sie außerhalb des Endlagers unter gut bekannten und kontrollierbaren Bedingungen hergestellt werden, weitaus geringeren Unsicherheiten als die geotechnischen Barrieren. Der bestimmende Parameter sowohl für die Abfallmatrix als auch für den Behälter ist die jeweilige Korrosionsrate. Diese kann an den zum Einsatz kommenden Materialien unter Laborbedingungen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden.

Unsicherheiten, vorrangig vom epistemischen Typ, bestehen bei technischen Barrieren hauptsächlich bezüglich des Ablaufs des Korrosionsvorgangs. Dieser kann durch physikalische oder chemische Prozesse beeinflusst werden, die untereinander gekoppelt und schwer vorherzusagen sind. So hängt die Korrosionsgeschwindigkeit von der Temperatur ab; diese wird durch die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst, welche sich ihrerseits durch den Korrosionsvorgang verändert. Die hydraulische Leitfähigkeit des Korrosionsprodukts spielt ebenfalls eine Rolle, da sie den Nachfluss von Flüssigkeit begrenzen kann. Aufgrund der Volumenzunahme bei der Korrosion können erhebliche Drücke entstehen, wodurch ebenfalls der weitere Zutritt von Flüssigkeit behindert werden kann.

Darüber hinaus ist nicht in jedem Fall sicher, von welcher chemischen Zusammensetzung die angreifende Flüssigkeit sein wird. Deren Unsicherheit kann, z. B. bei einem über 1 Mio. Jahre reichenden Zeitraum, die Unsicherheit des Gesamtprozesses der Korrosion dominieren.

Es ist nicht auszuschließen, dass es aufgrund mikrophysikalischer Gegebenheiten zu lokalem Lochfraß kommt. Dadurch kann ein Behälter erheblich früher undicht werden, als bei gleichmäßiger Flächenkorrosion zu erwarten wäre. In diesem Fall liegt allerdings kein Totalausfall des Behälters vor, ein großer Teil seiner Barrierenwirkung bleibt bis zur vollständigen Zerstörung erhalten. Obwohl Behälter für hochradioaktive Abfälle mit großer Sorgfalt hergestellt werden, ist nicht völlig auszuschließen, dass in einem

Endlager ein kleiner Anteil der Behälter aufgrund von Produktionsfehlern bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt undicht wird.

In einem HAW-Endlager befindet sich eine große Anzahl identischer Systeme aus Behälter und Abfallmatrix. Bei jedem einzelnen werden die Korrosionsprozesse etwas unterschiedlich ablaufen und zu einer aleatorischen Streuung der Standzeiten führen. Bei Modellrechnungen zur Langzeitsicherheitsanalyse trägt man dieser Streuung Rechnung, indem man eine geeignete Behälterausfallfunktion verwendet. Die Parameter der Ausfallfunktion unterliegen dann ihrerseits gewissen Unsicherheiten.

4.4 Zusammenwirken des Barrierensystems bei verschiedenen Referenzkonzepten

Durch eine langzeitsicherheitsanalytische Bewertung der Eigenschaften einer einzelnen Barriere mit Hilfe geeigneter Performance-Indikatoren kann lediglich ihre Qualität, nicht aber ihre Wirksamkeit im Gesamtsystem beurteilt werden. Da die verschiedenen Bereiche eines Endlagers unter Umständen von sehr unterschiedlicher Relevanz für die Langzeitsicherheit sein können, ist eine Analyse der Wirksamkeit verschiedener Komponenten im Gesamtsystem für die Planung und Optimierung des Endlagers von großer Wichtigkeit. Die Vorgehensweise für eine derartige Analyse wird im Folgenden kurz beschrieben.

4.4.1 Struktur des Endlagersystems

Für eine Bewertung von Barriereigenschaften innerhalb des Gesamtsystems ist es sinnvoll, das Endlagersystem in abgegrenzte Bereiche zu unterteilen und dafür jeweils dieselben Performance-Indikatoren, z.B. Schadstoffströme oder -konzentrationen, zu berechnen. Solche Teilbereiche, die im Folgenden als Compartments bezeichnet werden, können aus einzelnen Barrieren (z. B. einem Schachtverschluss oder dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich), aus Gruppen von Barrieren (z. B. eine Reihe von Streckenverschlüssen) oder aus Kombinationen von Barrieren und anderen Komponenten des Endlagers einschließlich des Deckgebirges und der Biosphäre bestehen.

Dabei ist es nicht unbedingt zwingend, die Compartments überschneidungsfrei zu definieren; sie können parallel angeordnet, hintereinander geschaltet oder auf mehreren Ebenen verschachtelt sein. Die gesamte Endlagerstruktur wird durch eine logische

Struktur von Compartments wiedergegeben. Bei den verschiedenen Referenzkonzepten sind dabei unterschiedliche Aspekte zu beachten. Die Struktur sollte aber vor allem an die individuellen Besonderheiten des betrachteten Systems angepasst sein. Die im Folgenden beschriebenen Strukturen sind daher exemplarisch zu sehen.

Referenzkonzept Steinsalz

Ein Endlager im Steinsalz besteht aus einer Anordnung von versetzten Grubenbauen und Strecken, die durch Verschlüsse und Dämme voneinander abgetrennt sind. Die Abfälle befinden sich in Behältern vom gleichen Typ oder einiger weniger verschiedener Typen in Einlagerungsstrecken oder Bohrlöchern. Diese können zu Einlagerungsfeldern zusammengefasst sein. Innerhalb des Grubengebäudes ist nach einem Zutritt von Flüssigkeit mit advektiven Schadstoffbewegungen zu rechnen.

Es ist sinnvoll, alle gleichartigen Behälter, soweit sie auch in gleicher Weise eingelagert sind, zu einem einzigen Compartment zusammenzufassen. Mit einer unterschiedlichen Entwicklung solcher Behälter ist nur insoweit zu rechnen, wie sie zu unterschiedlichen Zeiten ausfallen. Da man kaum Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Behälterausfall hat, ist es für die Systembewertung normalerweise nicht nötig, z.B. zwischen früh und spät ausfallenden Behältern zu unterscheiden. Verschiedene Behältertypen, ggf. noch nach Bohrlöchern und Einlagerungsstrecken unterschieden, bilden dann parallele Compartments der ersten Ebene.

Für ein besseres Verständnis der Vorgänge im Behälterinneren kann es sinnvoll sein, die Abfallmatrix und das Wasser im Behälter als parallele Compartments auf einer vorgelagerten Ebene zu betrachten. Alle Bohrlöcher bzw. Einlagerungsstrecken eines Einlagerungsfeldes können zu Compartments der zweiten Ebene zusammengefasst werden, die Einlagerungsfelder bilden die Compartments der dritten Ebene. Die vierte Ebene bildet das gesamte Nahfeld. Daran angeschlossen sind nacheinander das Fernfeld und die Biosphäre.

Referenzkonzept Tonstein

Der Aufbau eines Endlagers im Tonstein ist ähnlich wie im Steinsalz, es gibt jedoch keine oder nur geringe Konvergenz und der advektive Schadstofftransport innerhalb des Nahbereichs und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs spielt nur eine untergeordnete Rolle. Daher ist es wenig sinnvoll, diesen durch Berechnung von Perfor-

mance-Indikatoren genauer zu untersuchen. Es genügt, jeweils gleichartige Behälter zu parallelen Compartments zusammenzufassen und die Tonformation direkt als Folgecompartiment zu betrachten. Daran schließen sich der Aquifer und die Biosphäre an.

Referenzkonzept Granit

Beim Granitkonzept wird jeder Behälter einzeln mit einem Bentonitmantel umgeben, der die wichtigste Barriere darstellt und auf jeden Fall als Compartment betrachtet werden sollte. Das Wirtsgestein selbst hat eine relativ hohe hydraulische Leitfähigkeit, daher braucht der Nahbereich nicht weiter strukturiert zu werden. Fernfeld und Biosphäre werden wie beim Salzkonzept angeschlossen.

4.4.2 Darstellung des Systemverhaltens durch Performance-Indikatoren

Um die Funktionsweise des Gesamtsystems zeitabhängig darzustellen, können verschiedene Arten von Performance-Indikatoren berechnet werden. Durch eine Darstellung der Schadstoffinventare oder Konzentrationen in den einzelnen Compartments erhält man einen guten Überblick darüber, wo sich die Radionuklide zu welcher Zeit befinden. Dadurch lassen sich z.B. Bereiche identifizieren, die von den Radionukliden kaum erreicht werden, oder in denen sich Radionuklide ansammeln.

Aussagen über die Bewegung der Radionuklide durch das Endlagersystem können besser aus Schadstoffströmen zwischen den Compartments abgeleitet werden. Daran lässt sich z.B. erkennen, welche Barrieren besonders stark durchströmt werden und ggf. zu verstärken sind.

Wenn die Wirksamkeit der einzelnen Barrieren im Gesamtsystem beurteilt werden soll, ist die Berechnung von zeitlich integrierten Strömen zwischen den Compartments sehr hilfreich. Durch zeitliche Integration des Schadstoffausstroms aus einem Compartment erhält man eine Größe, die nur zunehmen kann. Solange nur stabile Nuklide betrachtet werden, stimmt diese Größe mit dem gesamten aus einem Compartment bis zum betrachteten Zeitpunkt freigesetzten Inventar überein. Sobald radioaktiver Zerfall eine Rolle spielt, ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Bei zeitlich integrierten Strömen wird der Zerfall automatisch nur in dem Maße berücksichtigt, wie er vor dem Moment der Freisetzung, also innerhalb des betrachteten Compartments erfolgt. Erfolgt der Zerfall innerhalb, so kann dies der Verzögerungswirkung der Barriere zugeschrieben werden, ein Zerfall außerhalb sagt dagegen nichts über die Wirksamkeit der Barriere aus. Die

Kurven der integrierten Freisetzung steigen typischerweise zunächst relativ steil an und erreichen früher oder später einen charakteristischen asymptotischen Endwert. Durch Vergleich dieser Endwerte für aufeinander folgende Compartments kann man direkt erkennen, welche Inventaranteile innerhalb des jeweiligen Compartments dauerhaft zurückgehalten werden oder zerfallen. Daran lässt sich die Wirksamkeit der Barrieren sehr gut erkennen.

Alle hier genannten Performance-Indikatoren können nuklidspezifisch, z.B. auf der Basis von Aktivitäten berechnet werden. Allerdings sollten die Zerfallsreihen immer im Zusammenhang betrachtet werden. Durch eine solche Analyse erhält man Aussagen über das Systemverhalten gegenüber einem bestimmten Einzelnuklid oder den Nukliden einer Zerfallsreihe.

In den meisten Fällen wird jedoch eher das Systemverhalten gegenüber dem Gesamtspektrum an Radionukliden von Interesse sein. Einfaches Aufsummieren der Aktivitäten verschiedener, nicht zu einer Zerfallsreihe gehörender Radionuklide ergibt jedoch keine sinnvolle Größe. Es wird ein Wichtungsschema benötigt, mit dessen Hilfe die Aktivitäten des gesamten Nuklidspektrums in eine aussagekräftige und sicherheitsbezogene integrale Größe umgerechnet werden können. Hierfür können die Ingestionsdosiskoeffizienten nach ICRP 72 verwendet werden. Diese geben für jedes Radionuklid an, welche Äquivalentdosis (in Sv) die Ingestion von 1 Bq des Nuklids im menschlichen Körper hervorruft. Diese Größe wird als Radiotoxizität bezeichnet und kann über alle Radionuklide summiert werden.

Bei den Ingestionsdosiskoeffizienten sind die Wirkungen aller während 50 Jahren nach der Ingestion entstehenden Produkte aus dem radioaktiven Zerfall berücksichtigt, jedoch nicht die solcher Zerfallsprodukte, die bereits vor der Ingestion entstanden sind. Daher ist darauf zu achten, dass die Ingestionsdosis aus vorher entstandenen und im Gemisch enthaltenen kurzlebigen Zerfallsprodukten berücksichtigt wird. Handelt es sich um Zerfallsprodukte mit deutlich kürzerer Halbwertszeit als das Ausgangsnuklid, kann von einem radioaktiven Gleichgewicht und damit von gleicher Aktivität ausgegangen werden.

Durch eine integrierte Analyse des Gesamtsystems durch sukzessive Berechnung von Schadstoffströmen, Konzentrationen oder zeitintegrierten Strömen für sinnvoll gewählte Compartments kann eine vertiefte Verständnisbildung für die im Endlager ablaufenden Vorgänge im Gesamtzusammenhang erreicht werden. Im Unterschied zur isolier-

ten Analyse einer einzelnen Barriere werden dabei auch Wechselwirkungen sichtbar. Auf diese Weise können kritische und weniger kritische Komponenten identifiziert werden, deren Auslegung dann dementsprechend unter sicherheitsbezogenen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu optimieren ist.

5 Forschung und Entwicklung für den Langzeitsicherheitsnachweis

Wie die Darstellung des Vorgehens in Kapitel 3 und 4 gezeigt haben, sind sicherheitsanalytische Untersuchungen für Endlager Vorhaben, die besondere wissenschaftliche Grundlagen und spezifische Techniken erfordern. Die zur Erarbeitung konzeptueller Modelle und ihre Umsetzung in numerische Lösungsverfahren erforderlichen Fachdisziplinen sind breit verteilt, das notwendige Fachwissen in den verschiedenen Disziplinen ist sehr eng auf die Notwendigkeiten bei der Endlagerung ausgerichtet und die zu lösenden Aufgabenstellungen finden nur geringe Anwendung außerhalb der Endlagerung. Diese Rahmenbedingungen führen dazu, dass entsprechende spezielle Forschung und Entwicklung (FuE) für die Bearbeitung der Teilaufgaben betrieben und bereit gestellt werden muss.

Das Kapitel 5.1 beschreibt die Rolle der Forschung und Entwicklung für sicherheitstechnische Untersuchungen detaillierter und gibt einen Überblick über die Arten von FuE in diesem Bereich. Die Organisation der FuE ist in Kapitel 5.2 näher beschrieben, wobei insbesondere das Verhältnis zwischen nationalen und internationalen FuE-Anstrengungen thematisiert ist. Die derzeitigen Aktivitäten und die deutschen Schwerpunkte auf dem Gebiet der FuE sind in Kapitel 5.3 behandelt. Kapitel 5.4 gibt auf dem Hintergrund des derzeit erreichten Stands und der aktuellen Diskussion über die künftige Forschungsorientierung einen Ausblick über die künftige Richtung der Endlagerforschung.

5.1 Die Rolle von Forschung und Entwicklung beim Langzeitsicherheitsnachweis

Die Endlagerforschung und –entwicklung ist anwendungsbezogene Forschung, da sie generell auf die Anwendung (Erkundung, Planung, Genehmigungsverfahren, Betrieb und Verschluss eines Endlagers) ausgerichtet ist. Sie kann sich auf die Grundlagenforschung, also auf den reinen Wissensfortschritt gerichtete Forschung, auswirken, sie ist aber selbst nicht darauf ausgerichtet.

Wissenschaftlich-technische FuE für die Endlagerung ist auf das Ziel konzentriert, eine ökologisch vertretbare Lösung zu erarbeiten. Die wichtigsten wissenschaftlichen Anstrengungen werden dabei auf Gebieten herbeigeführt bzw. benötigt, die in anderen Anwendungsbereichen der Wissenschaft keine oder eine nur unwesentliche Rollen

spielen. Beispielhaft sind hierfür die sehr langsam verlaufenden Vorgänge bei Veränderungen an geologischen und technischen Barrieren genannt. Das wissenschaftlich fundierte Verständnis dieser Prozesse ist für die Endlagerung, den Sicherheitsnachweis und für das Genehmigungsverfahren eine wichtige Voraussetzung. Es ist nahezu ausschließlich für diesen Zweck verwendbar, weil die Anforderungen in anderen Bereichen von Wissenschaft und Technik nicht vergleichbar vorhanden sind oder weil z. B. Nachweise gleicher Qualität und von ähnlichem Zeithorizont nicht erforderlich sind. In einigen wenigen Fällen ergeben sich Überschneidungen mit anderen Anwendungsgebieten, vor allem in technischer Hinsicht (z. B. im Hinblick auf fortgeschrittene Techniken für Schacht- und Streckenverschlüsse für Endlager in Steinsalz, die auch im Kali- oder Steinsalzbergbau Anwendung finden können).

Die verschiedenen FuE-Bereiche sind in den verschiedenen Realisierungsstufen eines Endlagers in unterschiedlicher Intensität erforderlich. In Abb. 24 ist für die verschiedenen Phasen der Endlager-Realisierung die unterschiedlich intensive Bedeutung verschiedener Fachgebiete der FuE symbolisch dargestellt.

An Verfahrensschritten werden mehrere Teilstufen der Standortauswahl und – erkundung, das Genehmigungsverfahren, der Betrieb und der Verschluss des Endlagers unterschieden. Der Bedarf ist nach vier hauptsächlichen Fachgebieten untergliedert: den Geowissenschaften, der technischen Entwicklung, der Felsmechanik und Felshydraulik sowie der Modellentwicklung. Dargestellt sind nur die den Antragsteller/Betreiber eines Endlagers betreffenden Aufgaben, der Bedarf auf Seiten von Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden etc. ist ähnlich, weicht aber insbesondere in zeitlicher Hinsicht und im Hinblick auf die Intensitäten (z. B. bei der technischen Entwicklung) etwas ab.

Die Abbildung zeigt, dass die Intensität der Zuarbeit aus den vier hauptsächlichen wissenschaftlich-technischen Kompetenzbereichen bei verschiedenen Verfahrensschritten, und damit auch in zeitlicher Hinsicht, sehr unterschiedlich ist:

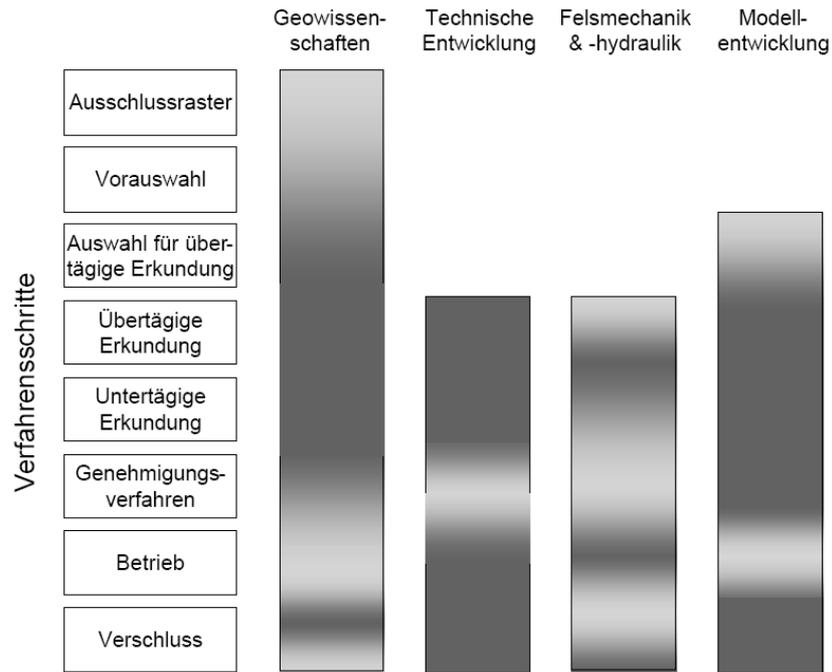


Abb. 24: Vom Verfahrensbetreiber benötigte Kompetenzbereiche für FuE-Tätigkeiten zu den verschiedenen Verfahrensschritten, aus /GRS 06/

- Die Geowissenschaften sind insbesondere in den Phasen der Standortauswahl und -charakterisierung sowie nach Abschluss des Betriebs (Verschlussphase) überdurchschnittlich involviert.
- Der Kompetenzbereich Technische Entwicklung ist in der Vorbereitung des Genehmigungsverfahrens sowie im laufenden Betrieb und beim Verschluss gefragt.
- Aspekte der Felsmechanik und -hydraulik stehen bei den Verfahrensschritten der übertägigen Erkundung, während des Betriebs und wegen der Maßnahmen zum Abschluss der Verschlussphase sowie beim Monitoring eine wichtige Rolle.
- Im Falle der Modellentwicklung ist der Beitrag lediglich in der (zeitlich langen) Betriebsphase geringer, in den anderen Verfahrensschritten nach erfolgter Vorauswahl und bis zum Verschluss des Endlagers ist der Bedarf gleichmäßig intensiv, da Sicherheitsanalysen gemäß Kapitel 2.1 das gesamte Verfahren begleiten und in angemessenen Stufen den jeweils erreichten Kenntnisstand abbilden sollten.

Die Abbildung symbolisiert, wann FuE-Ergebnisse benötigt und angewendet werden. Abhängig vom inhaltlichen und zeitlichen Aufwand für die konkreten FuE-Projekte ist jeweils noch ein zeitlicher Vorlauf erforderlich, so dass die eigentlichen Arbeiten früher begonnen werden müssen, um rechtzeitig Ergebnisse verfügbar zu haben. Der notwendige Vorlauf kann bei komplexeren Fragestellungen bis zu zehn Jahre betragen. Dieser notwendige Vorlauf ist gemäß /GRS 06/ bei einer vorausschauenden Planung der FuE-Entwicklung ressort- und projektspezifisch zu berücksichtigen.

Die Modellentwicklung schreitet ausgehend von generischen Modellierungen zu immer detaillierteren wirtsgesteins- und standortspezifischen Modellierungen fort. Im Hinblick auf die notwendige FuE lassen sich in jeder Stufe diejenigen wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen identifizieren, für die eine weitere Vertiefung des Kenntnisstands aussichtsreich erscheint. Die Identifizierung neuer FuE-Fragestellungen für die Modellentwicklung ergibt sich im Wesentlichen durch drei Effekte:

1. die evolutionäre Weiterentwicklung bestehender Modellierungen (kontinuierlich),
2. die Erkennung neuer Prozesse oder neuartiger Möglichkeiten (innovativ-integrativ),
und
3. den Übergang zu anderen Entsorgungs- und Endlager-Konzepten (diskontinuierlich).

Die meisten FuE-Aufgaben sind als Fortentwicklungen anzusehen. Wurde z. B. bei der generischen Modellierung auf eine detaillierte Modellierung der Nahfeldeffekte verzichtet (vernachlässigte Rolle von Behältern, Löslichkeiten oder geometrischen Effekten im Nahfeld) und hierfür von konservativ-abdeckenden Annahmen ausgegangen, ergeben sich die nächsten FuE-Schritte aus der Einschätzung des Einflusses dieser Effekte und entsprechenden Anstrengungen, verbesserte wissenschaftlich-technische Instrumente zu erreichen. Kann durch die FuE-Ergebnisse ein verbessertes Verständnis der Prozesse erreicht werden, ergibt sich eine verbesserte Modellierung.

Innovative Anstöße für FuE-Entwicklungen führen zur Integration bisher nicht bekannter neuer Prozesse oder auch zur Anwendung neuartiger Methoden und Möglichkeiten in der sicherheitsanalytischen Betrachtung. Beispiele für neu integrierte Prozesse, die in den vergangenen Jahren zu FuE-Anstrengungen und zur Integration in die Modellentwicklung geführt haben, sind die Erkennung der Bedeutung der langsamen anaeroben Gasbildung (etwa seit Ende der Achtziger Jahre) oder der Kolloidbildung für die

Ausbreitungscharakteristika von Radionukliden (etwa seit Beginn der Neunziger Jahre). In beiden genannten Fällen ist ein wissenschaftliches Grundverständnis der Effekte erarbeitet, bestimmte Aspekte bedürfen weiterer Forschungsanstrengungen und die Integration in Sicherheitsanalysen befindet sich in der Entwicklung. Auch für die Anwendung neuartiger Methoden und Möglichkeiten und deren Integration in sicherheitsanalytische Betrachtungen lassen sich zahlreiche Beispiele anführen: verbesserte Möglichkeiten der geochemischen Modellierung, erweiterte Möglichkeiten der Numerik/Rechentchnik, neue physikalische oder geochemische Methoden der Erkundung, usw. Durch intensiven internationalen wissenschaftlichen Austausch setzen sich neue Erkenntnisse oder Methoden auf nationaler wie internationaler Ebene relativ rasch in Anstöße für nationale FuE-Anstrengungen um.

Ein weiterer Anlass für eine Neubestimmung von Forschungsrichtungen ergibt sich aus einem grundlegenden Wechsel der Endlagerkonzeption oder durch die bewusste Offenhaltung von Konzepten bzw. der Eröffnung von neuen Alternativen (der Wirtsgesteinsauswahl, der Standortauswahl, der Endlagerkonzeption). Die FuE-Richtung ist sehr abhängig von solchen Wechseln, da sich die Modell-Werkzeuge teilweise grundlegend unterscheiden und weil die Anpassung an solche neuen Bedingungen erhöhten FuE-Aufwand erfordern. Beispiele für solche Konzeptänderungen waren in Deutschland der Übergang zur Direkten Endlagerung, in der Schweiz die Zurückstellung des Kristallins und der Entsorgungsnachweis für Tonstein oder in Frankreich die Einengung des ursprünglich breiteren Spektrums der untersuchten Wirtsgesteine auf Ton.

5.2 Organisation von Forschung und Entwicklung für sicherheitsanalytische Untersuchungen

Die Organisation von FuE für sicherheitsanalytische Untersuchungen ist in verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich strukturiert und richtet sich im Allgemeinen nach den nationalen Endlagerverantwortlichkeiten. Im Detail werden im Folgenden die in Deutschland praktizierten Organisationsarten und –zuständigkeiten vorgestellt, den deutschen Anteil an Forschung in internationalen Zusammenhängen mit eingeschlossen.

In Deutschland sind formell zwei unterschiedliche FuE-Arten zu unterscheiden:

- Anlagenbezogene FuE: FuE, die sich auf bestimmte Anlagen zur Endlagerung bezieht, einschließlich Standortuntersuchungen zur Charakterisierung und Eignungsfeststellung,
- Anwendungsbezogene anlagenunabhängige FuE: FuE, die sich nicht auf bestimmte Anlagen bezieht.

Hintergrund dieser Differenzierung ist, dass gemäß § 3 EndlagerVIV /MLV 04/ die Kosten für anlagenbezogene FuE den Abfallverursachern (über eine Umlage), die anlagenunabhängige FuE der Allgemeinheit (über staatliche Aufwendungen) zugeordnet werden. Soweit sich die FuE-Arbeiten z. B. für die Modellierung einer bestimmten Anlage ergeben und im Zusammenhang mit der Realisierung eines Endlagers stehen, ist für diese Aufgabe das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zuständig, die Kosten tragen gemäß /MLV 04/ die Abfallverursacher. Handelt es sich um Grundlagenarbeiten („Vorsorgeforschung“), ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) zuständig. Zusätzlich ist, in geringerem Umfang, noch FuE seitens der Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden zu betrachten, die diese z. B. zur Erfüllung ihrer Kontrollaufgaben (teils anlagenbezogen), zum aufgabenbezogenen Kompetenzerhalt (weitgehend anlagenunabhängige FuE) und zur Weiterentwicklung des einschlägigen Regelwerks für die Endlagerung betreibt. Als ein verwandtes Forschungsgebiet mit einzelnen themenbezogenen Berührungspunkten zur Endlagerung ist noch der Forschungsbereich „Entsorgung von gefährlichen Abfällen in tiefen geologischen Formationen“ des BMBF /BMB 04/ zu sehen (z. B. Arbeiten zur Modellierung von Grundwasserbewegung bei salinen Wässern oder Arbeiten zu Verschlussbauwerken in Salz).

Die FuE-Aufgaben für die Vorbereitung und Abwicklung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich Endlagerung sind durch das BMWi in erheblichem Maße auf Projektträger übertragen. Die Projektträger sind in den meisten Fällen bei den privatrechtlich organisierten Großforschungseinrichtungen angesiedelt, die die Ministerien auf Basis vertraglicher Regelungen in ihrer Arbeit unterstützen. Diese arbeiten nach allgemeinen Richtlinien und nach besonderen Weisungen der Ministerien und nehmen bei der Projektbetreuung keine eigenen Aufgaben, sondern die des Bundes wahr (im rechtlichen Rahmen einer Beleihung) /PTK 07/.

Bei der Förderung von FuE-Aktivitäten auf dem Gebiet der Endlagerung durch BMWi sind institutionelle und projektbezogene Arten zu unterscheiden. In Abb. 25 sind die

jährlichen Ausgaben für die Zeit zwischen 1981 und 2002 sowie die Summe dargestellt¹.

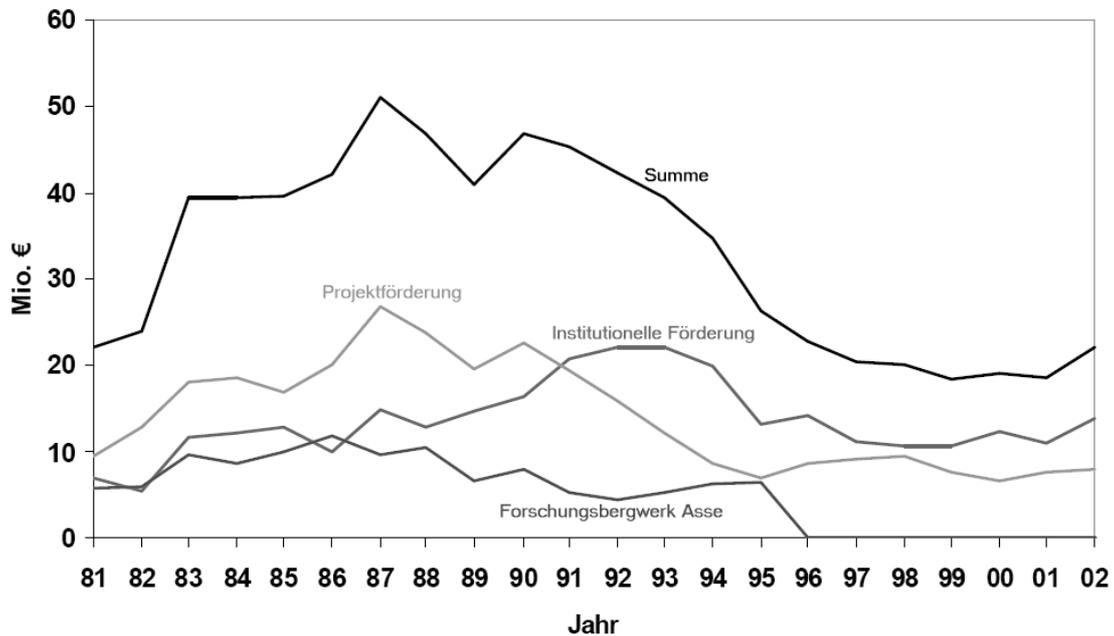


Abb. 25: Ausgaben für FuE für die Endlagerung durch BMBF und BMWi in den Jahren 1981 – 2002, aus /GRS 06/

Die Ausgaben für institutionelle und projektbezogene Förderung von F&E liegen, nach früher stärker divergierendem Verhältnis und bei jährlichen Schwankungen, seit 1997 in einer ähnlichen Höhe. Die institutionelle Forschungsförderung stellt sicher, dass die Modellentwicklung im Hinblick auf Vorsorgeforschung unabhängig von der Realisierung konkreter Endlagerprojekte erfolgt. Im internationalen Bereich ist dies nicht durchgängig so organisiert, in vielen Ländern erfolgt die Modellentwicklung und –anwendung ausschließlich als privatwirtschaftlich organisiertes Dienstleistungsangebot. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Organisationsformen sind in /GRS 06/ diskutiert.

Wie an den deutschen Aufwendungen für die Endlagerforschung erkennbar ist, ergeben sich über die Jahre akkumuliert insgesamt hohe Beträge. Solange die Entscheidung über das zu verfolgende Wirtsgestein offen gehalten wird, wie dies in vielen Ländern der Fall ist, kann die Entwicklung der notwendigen Werkzeuge für die Sicherheitsanalyse in unterschiedlichen Wirtsgesteinen zusätzliche Kosten verursachen, hält

¹ Das BMBF war in früheren Jahren für einen Teil der Endlagerforschung zuständig.

aber andererseits Möglichkeiten offen. Soweit standortunabhängige Forschungsthemen zu bearbeiten sind, gibt es vielfach die Möglichkeit, sich an Vorhaben in anderen Ländern zu beteiligen und in gemeinsamen Projekten den Aufwand und die Kosten zu reduzieren. Deutschland beteiligt sich daher an Forschungsvorhaben im Ausland, z. B. am Betrieb von Untertagelabors oder an der Bearbeitung spezieller Forschungsthemen. Auch die EU-Forschungsprogramme fördern die Möglichkeit der Kooperation von Mitgliedsstaaten auf dem Gebiet der Endlagerforschung in Schwerpunktprojekten. Auf diese Weise wird neben der verbesserten Effizienz des Forschungsaufwands erreicht, dass sich Qualitätsstandards für die Endlagerforschung entwickeln und dass Erfahrungen und Ergebnisse von Forschung rascher verteilt werden. Die internationale Kooperation auf dem Gebiet der Endlagerforschung spielt daher eine wichtige Rolle bei der Fortentwicklung des Kenntnisstands bei Sicherheitsanalysen.

5.3 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der sicherheitsanalytischen Untersuchungen

Die in Deutschland aktuell betriebene Endlagerforschung lässt sich anhand der jeweiligen Förderprogramme beschreiben, der erreichte Bearbeitungsstand von Projekten aus den regelmäßig von den Projektträgern publizierten Berichten ablesen.

Das derzeit gültige Förderprogramm /PTW 07/ ist auf folgende Zielsetzungen fokussiert:

- A Endlagerkonzepte und Endlagerteilbereiche
- B Daten und Instrumente für die Sicherheitsanalyse
- C Kernmaterialüberwachung

Als Möglichkeiten zur Durchführung von Projekten werden folgende Unterlagelabors genannt:

- Ton: Mt. Terri/Schweiz, URL Mol, Belgien, Tournemire/Frankreich, Meuse/Haute-Marne/Frankreich
- Granit: FL Grimsel/Schweiz, HRL Äspö/Schweden

Nach /PTW 07/ liegt der Fokus auf Arbeiten in Unterlagelabors in Tongesteinen, während die Arbeit in den Untertagelabors in kristallinen Gesteinen nur bezogen auf spezifische Fragestellungen fortgesetzt wird.

Der Schwerpunkt der Projektförderung durch BMWi liegt gemäß /PTW 07/ im Themenbereich B, und damit auf den Daten und Instrumenten für die Sicherheitsanalyse. Die einzelnen Forschungsthemen dieses Themenbereichs sind:

- B1 Szenarienentwicklung
- B2 Geologische Barriere
- B3 Geochemisch-technische Barriere
- B4 Technische und geotechnische Barriere
- B5 Methoden und numerische Simulation
- B6 Qualifizierung von Modellen und Reduzierung von Unsicherheiten
- B7 Systemanalysen

Die Themenzusammenstellung zeigt, dass neben den Sicherheitsfragen zu Szenarien und Barrieren auch die Entwicklung und Qualifizierung von Modellen im engeren Sinne in B5 und B6 abgedeckt ist. Der Themenbereich B5 bezeichnet die beiden folgenden Forschungsthemen /PTW 07/:

- Weiterentwicklung und Aktualisierung der Methoden und Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen, insbesondere auf der Grundlage definierter Szenarien, modifizierter Entsorgungskonzepte und neuer Erkenntnisse aus FuE-Arbeiten unter Berücksichtigung der internationalen Entwicklung,
- Verbesserung Prozess beschreibender Modelle, insbesondere durch Entwicklung gekoppelter Modelle.

Diese Themen beziehen sich folglich unmittelbar auf die Modellentwicklung und ihre Anpassung an modifizierte Entsorgungskonzepte und ihre Verfeinerung/Absicherung. Im Themenbereich B6 werden genannt /PTW 07/:

- Anwendung existierender oder Entwicklung von Methoden und Verfahren für die Qualifizierung von Modellen zur Beschreibung thermischer, geomechanischer, hydrogeologischer und geochemischer Effekte (THMC-Kopplung),
- Qualifizierung von Grundwasserströmungs- und Transportmodellen durch Labor- und In-Situ-Untersuchungen
- Überprüfung der Übertragbarkeit der Aussagen von Laboruntersuchungen auf Technikums- und reale Systeme

- Verbesserung der Aussagesicherheit von Langzeitsicherheitsanalysen
- Entwicklung von Methoden zum Abbau von Unsicherheiten
- Untersuchung relevanter Prozesse bzw. relevanter Indikatoren in natürlichen oder historisch-anthropogenen Systemen, die zur Erhöhung des Vertrauens in das Prozessverständnis oder die Simulationsergebnisse beitragen.

Diese Forschungsthemen befassen sich zwar ebenfalls mit Fragen der Modellierung, es steht aber eher die Absicherung von Eingangsgrößen und Parametern im Vordergrund.

Diese Schwerpunktsetzung im Forschungsprogramm für 2007 bis 2010 ist dem erreichten Stand der Modellierung angepasst und zeigt auf, dass der Forschungsbedarf heute weniger auf Seiten der Modellierung selbst als beim vertieften Verständnis des Langzeitverhaltens einzelner Barrieren und bei Wechselwirkungen liegt. Dies entspricht z. B. den Forderungen der RSK, die in /RSK 06/ Entwicklungsbedarf bei der Modellierung des Radionuklidtransports in dichtegeschichtetem Grundwasser unter Berücksichtigung der geochemischen Wechselwirkungen sieht (Stellungnahme zu 3.2).

5.4 Neue Schwerpunkte in der Endlagerforschung

Das aktuelle Förderkonzept /PTW 07/ ist eine Fortschreibung und Aktualisierung des vorherigen Förderkonzepts /PTW 01/, bei dessen Weiterentwicklung Fachkreise über Diskussionen miteinbezogen wurden.

Die RSK wurde vom BMU nach der Notwendigkeit generischen Forschungsbedarfs befragt (Frage 4 in /RSK 06/). In ihrer Stellungnahme weist die RSK auf weiter fort bestehenden standort- und konzeptspezifischen FuE-Bedarf und den notwendigen Kompetenzerhalt hin /RSK 06/.

Das aktuelle Förderkonzept des BMWi für die Endlagerforschung geht davon aus, dass alle bisher gewonnenen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse bestätigen, dass die Realisierung eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle im Steinsalz möglich ist. In der Phase von 2007 bis 2010 sollen Fragestellungen der Endlagerung in Steinsalz mit höchster Priorität verfolgt werden. Mit etwas geringerer Priorität soll der Kenntnisstand der Endlagerung in Tongesteinen erhöht werden. Das Förderkonzept unterteilt die verbleibenden Forschungsaufgaben nach grundlegenden Erkenntnissen

und anwendungsbezogener Grundlagenforschung. Des Weiteren soll es zukünftig eine Entwicklung weg von der Grundlagenforschung hin zu standort- und anlagenbezogenen Arbeiten geben. Gefördert werden sollen insbesondere die als Grundlage für einen Sicherheitsbericht für Endlager erforderlichen wissenschaftlichen Arbeiten.

Die grundlegenden Erkenntnisse sollen die Machbarkeit der sicheren Endlagerung in einem konkreten Projekt untermauern. Darüber hinaus sollen die künftigen Forschungsarbeiten im Hinblick auf die überragende Bedeutung der Endlagersicherheit dazu beitragen,

- die Aussagesicherheit von Analysen zu verbessern,
- die Genauigkeit dazu benötigter Parameter zu erhöhen,
- Einzelfragestellungen zu behandeln mit dem Ziel, eine höhere Robustheit des Gesamtsystems zu erreichen,
- die Ergebnisse der rechnerischen Simulation komplexer Systeme durch Labor- und Feldversuche experimentell zu überprüfen,
- das Vorgehen bei der Erstellung des Safety Case auf Plausibilität und Systematik zu prüfen und ständig weiter zu entwickeln,
- den Stand der Wissenschaft praktisch anwendbar zu machen.

Dagegen konzentriert sich die anwendungsbezogene Grundlagenforschung im Hinblick auf eine zügige und zielstrebige Lösung der Endlagerfrage auf folgende Schwerpunkte:

- Die Entwicklung von Sicherheitsnachweiskonzepten und die Schaffung der notwendigen Grundlagen für Systemanalysen, die konform mit den Anforderungen eines Planfeststellungsverfahrens sind.
- Die Überführung der für die Errichtung, den Betrieb und den Verschluss eines Endlagers notwendigen technischen und sonstigen Lösungen in den Stand der Technik, einschließlich der Maßnahmen zur Kernmaterialüberwachung.
- Die Förderung wissenschaftlich-technischer Kompetenz auf hohem Niveau.

Die Erkenntnisse aus der Endlagerforschung sollen eine belastbare Grundlage für den Einstieg in ein Genehmigungsverfahren für ein Endlager bieten. Mit dem Einstieg in ein Genehmigungsverfahren werden für die Forschung veränderte Schwerpunkte und Anforderungen gesehen, die entsprechend zu einer Neuausrichtung der anwendungsbe-

zogenen Grundlagenforschung entsprechend dem Fortschritt des Endlagerprojektes führen.

6 Literatur

Hinweis: Dieses Literaturverzeichnis enthält alle in diesem Anhang zitierte Literatur.

- /AEC 94/ AECL: Environmental Impact Statement on the Concept for Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste. - AECL-10711, COG-93-1, 1994.
- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte,- Empfehlungen des AkEnd. - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, im Auftrag des BMU, 260 S., Köln, 2002.
- /ALB 04/ Albrecht, I; Appel, D.; Habler, W.; Kreuzsch, J.: Bestimmung des natürlichen Isolationspotenzials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle – Abschlussbericht, Hannover 16.7.2004.
- /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.
- /BAL 07/ Baltès, B.; Röhlig, K.-J.; Kindt, A. (GRS): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen – Entwurf der GRS -. – GRS-A-3358, Köln, 2007.
- /BGR 07/: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Projekt Eignungsuntersuchung Gorleben. - http://www.bgr.bund.de/cln_030/n_458552/DE/Themen/Geotechnik/Projekte/Endlagerstandorte/Erkundung.html.
- /BMB 04/ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Bundesbericht Forschung 2004. - Berlin, 2004.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

- /COA 04/ United States Court of Appeals for the District of Columbia Circuit: Nuclear Energy Institute Inc. / Environmental Protection Agency, No. 01-1258. – Decided July 9, 2004, Washington (DC) 2004.
- /DOE 08/ US Department of Energy (US-DOE): Yucca Mountain Repository License Application – Safety Analysis Report. – DOE/RW-0573, Rev. 0, Las Vegas, June 2008.
- /EPA 05/ Environmental Protection Agency (US-EPA): Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, Nevada; Proposed Rule. – 40 CFR Part 197, Federal Register Vol. 70, No. 161, August 22, 2005.
- /GRS 98/ Baltes, B.; Röhlig, K.J.: Szenarienanalysen im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle. GRS-A-2633, Köln, 1998.
- /GRS 06/ 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", GRS-A-3132, Köln, 2006.
- /HER 83/: Herrmann, A.G.: Radioaktive Abfälle. – Berlin/Heidelberg, 1983.
- /HER 98/ Herrmann, A.G.; Röthemeyer, H.: Langfristig sichere Deponien. – Berlin/Heidelberg, 1998.
- /HSK 04/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA. - HSK 23/73, Schweiz Würenlingen, 2004.
- /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.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

- /JNC 00/ 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.
- /JON 04/ 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.
- /KOS 04/ Kosakowski, G.: Time-dependent flow and transport calculations for Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis). - PSI Bericht Nr. 04-10, 2004.
- /LIT 03/ Little, R.; Robinson, P.; Humphreys, P.; Schneider, J.: The Application of the AMBER Software Tool to the Geological Disposal of Radioactive Waste. - Paper presented at the 6th Slovak-Czech Seminar on the Geological Disposal of Radioactive Waste, Piestany, 26-28 August 2003.
- /NAG 94/ Nagra, Kristallin-I – Safety assessment report. - NTB 93-22E, 1994.
- /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/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (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 Opalinusclay - 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.
- /NEA 00/ Nuclear Energy Agency (NEA): Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste: An International Database. Nuclear Energy, Vol. 2000, No. 14, pp. 1-90, OECD-NEA, Paris, 2000.
- /NEA 03a/ 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.
- /NEA 03b/ 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., Paris, 2003.
- /NEA 05/ Organisation for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste Version 1.0. – Paris, 2005.
- /OND 01/ Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS): SAFIR 2 - Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. - NIROND 2001–06 E, 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.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

- /PAG 88b/ Marivoet, J.; Bonne, A.: PAGIS - Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste – Disposal in Clay Formations. – Brüssel/Luxemburg, 1988.
- /PRÖ 04/ 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.
- /PTK 07/ Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe - Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE): Aufgaben. – Abrufbar unter <http://www.fzk.de> am 3.7.2008.
- /PTW 01/ Projektträgerschaft 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.
- /PTW 07/ Projektträgerschaft Wassertechnik und Entsorgung (PtWT+E): Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007 – 2010), Förderkonzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. – Karlsruhe, 2007
- /RSK 06/ 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. Abrufbar unter: <http://www.rskonline.de> am 24.07.2008
- /RSK 08/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) / Strahlenschutz-Kommission (SSK): Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK zum GRS-Bericht „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“. – Juli 2008.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

- /SKB 99a/ Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Geosphere Performance Indices: Comparative measures for site selection and safety assessment of deep waste repositories, R-99-01, Stockholm, 1999.
- /SKB 99b/ 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.
- /SKI 96/ Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI): SITE 94 - Deep Repository Performance Assessment Project. - SKI Report 96:36, 1996.
- /STU 01/ Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK): Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel. - Guide YVL 8-4, 2001.
- /TEX 03/ 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> am 24.07.2008
- /TIL 99/ Vieno, T.; Norman, H.: Safety Assessment of Spent Fuel Disposal in Hästholmen, Kivetti, Olkiluoto and Romuvaara. - TILA-99. Posiva 99-07, 1999.
- /MLV 04/ 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).

7 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.

Albrecht, I.; Appel, D.; Habler, W.; Kreuzsch, J.: Bestimmung des natürlichen Isolationspotenzials und des Nachweiszeitraums verschiedener geologischer Strukturen und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle – Abschlussbericht, Hannover 2004.

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

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

Becker, D.A.; Buhman, D.; Storck, R.; Alonso, J.; Cormenzana, J.-L.; Hugi, M.; Van Gemert, F.; O'Sullivan, P.; Laciok, A.; Marivoet, J.; Sillen, X.; Nordman, H.; Vieno, T.; Niemeyer, M.: Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN). – Final Report, EUR 19965, 2002.

Becker, A.; Fischer, H.; Hofer, C.; Kloos, M.; Krzykacz, B.; Martens, K.H.; Röhlrig, 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. European Commission, Luxembourg, EUR 17449/3a EN, 1997.

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), Washington(DC), 1995.

Brendler, V.: Chemische Speziation gelöster Stoffe. Abrufbar unter: <http://www.fz-rossendorf.de/pls/rois/Cms?pOid=12717&pNid=0&pContLang=de>

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

Brewitz, W., Buhmann, D., Fein, E., Hirsekorn, R.-P., Kühle, Th., Noseck, U., Storck, R. und Ch. Tix.: Erarbeitung und Bewertung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Sicherheitsanalyse eines Endlagers in der Nachbetriebsphase, GRS-136 (September 1996) ISBN 3-923875-87-8, Braunschweig 1996.

Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 27/91, Neuherberg, 1991.

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Grundsätze für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle – Die Sicherheitsphilosophie des BfS; 2. Entwurf Dezember 2004.

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Endlagerung radioaktiver Abfälle als nationale Aufgabe. - Broschüre, 61 Seiten, Salzgitter, 2005. Abrufbar unter: http://www.bfs.de/bfs/druck/broschueren/Endlagerung_national.pdf am 04. 12. 2006.

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz. - Salzgitter 2005.

Bundesministerium des Innern (BMI): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk; Rdschr. D. BMI v. 20.4.1983: RS – AGK 3 –515 790/2.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Bundesbericht Forschung 2004. - Berlin, 2004.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung - Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen, Bundesanzeiger Nr. 64a vom 31.3.1990.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Untersuchungen zur Sicherheit von Endlagern für radioaktive Stoffe nach ihrem Verschluss, BMU 2003-618, Berlin, 2003.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Berlin, 2006.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitstechnische Einzelfragen zur Endlagerung, Stand: November 2001. 2002.
Abrufbar unter:
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/atomkraft_sicherheitst_einzelfragen.pdf am 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.

Diekmann, N.; Hunsche, U.; Meister, D.: Über das geomechanische Verhalten von Steinsalz bei erhöhten Temperaturen. - Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 137. p. 29-46, 1986.

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

Gribi, P. ; Klos, R; Kosakowski, G.; Mayer, G.; Robinson, P.; Smith, P.: Project Opalinus Clay. Models, Codes and Data for Safety Assessment. - NTB 02-06 Nagra, Wettingen, 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.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

Baltes, B.; Heuser, H.; Kindt, A.; Thomas, W.: Entwurf - Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Stand 12.03.2002.

Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. - GSF-Bericht 27/91, Neuherberg, 1991.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk – überarbeitete Diskussionsgrundlage; Auftrags-Nr.: 854751; GRS-A-2990; Köln, 2002.

Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA): Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). - 2005. Abrufbar unter: <http://www.ksa.admin.ch/website/pdf/KSA-Stellungnahme%20EN2002.pdf> am 05. 12. 2006

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.

Helmig, R.: Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface. Springer-Verlag, 1997.

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

Integration Group for the Safety Case (IGSC): The Role of the Biosphere in a Safety Case IGSC TOPICAL SESSION at the third IGSC Meeting 24th October 2001

International Atomic Energy Agency (IAEA): Siting of Geological Disposal Facilities. – Safety Series No. 111-G-4.1, Vienna 1994.

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. Abrufbar unter: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1372_web.pdf am 24.07.2008

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

International Atomic Energy Agency (IAEA): Regulatory decision making in the presence of uncertainty in the context of the disposal of long lived radioactive wastes - Third report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal, IAEA-TECDOC-975, Vienna, 1997.

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.

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.

International Atomic Energy Agency (IAEA): Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste - Proceedings of a specialists meeting held in Vienna, 18–22 June 2001 IAEA-TECDOC-1282, Vienna, 2001. Abrufbar unter: <http://www-pub.iaea.org> am 24.07.2008

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 Coordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS), IAEA-BIOMASS-6, Vienna, 2003.

International Atomic Energy Agency (IAEA): Natural Activity Concentrations and Fluxes as Indicators for the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal. – TECDOC Series No. 1464, Vienna 2005.

International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste Safety Requirements. – Safety Standards Series No. WS-R-4, Vienna, 2006.

International Commission of Radiological Protection (ICRP): Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste. - ICRP-Publication 46, 1985.

International Commission of Radiological Protection (ICRP): Radiation Protection Policy for the Disposal of Solid Radioactive Waste. - ICRP-Publication 77, 1997.

International Commission of Radiological Protection (ICRP): Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long Lived Solid Radioactive Waste, ICRP-Publication 81, 2000

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.

Keller, S.: Projekt Gorleben. Ermittlung und Analyse von Szenarien für den Standort Gorleben. Auswahl (screening) von ZEP. BGR Hannover, 2001.

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.: Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser.- 2. Aufl., R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1992.

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

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

Kolditz, O.: Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluftgestein. Gebrüder Borntrae-
ger, Berlin, Stuttgart, 1997.

Kühle, T.; Zude, F.; Lührmann, L.: Das eindimensionale Transportprogramm CHET1
unter der Berücksichtigung der Sorption nach dem K_d -Konzept. - GRS-124,
Köln, 1996.

Kull, H. u. a.: Two-Phase-Flow Experiment in the Fractured Rock of the HRL Äspö. -
GRS-183, Köln, 2002.

Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R.: Spent Fuel Performance assessment (SPA) for a
Hypothetical Repository in Crystalline Formations in Germany. - GRS-154,
Köln, 2000.

Lührmann, L.; Noseck, U.: Das eindimensionale Transportprogramm CHET2 unter Be-
rücksichtigung nichtlinearer, elementspezifischer Gleichgewichtssorption. -
GRS-125, Köln, 1996.

Marivoet, J.; Bonne, A.: PAGIS - Performance Assessment of Geological Isolation Sys-
tems for Radioactive Waste – Disposal in Clay Formations. –
Brüssel/Luxemburg, 1988.

Marschall, P. u. a.: Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN). NAGRA,
Technical Report 99-07, Wettingen (Schweiz), 1999.

de Marsily, G.: Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. - 1.
Aufl.; Academic Press; San Diego u.a., 1986.

Mazurek, M.; Pearson, F.J.; Volckaert, G.; Bock, H.: Features, Events and Processes
Evaluation Catalogue for Argillaceous Media, NEA, No. 4437, Paris, 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.

Müller-Lyda, I. (ed.): Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. GRS-Workshop vom 29. – 30-Mai 1996. GRS-129, Köln, 1997.

National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (NAGRA): FEP management for the Opalinus Clay safety assessment. - Nagra Technical Report NTB 02-23, Wettingen, 2002.

Noseck, U.: Gegenüberstellung einiger Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager in Granit- und Salzformationen GRS-135 (September 1996), Braunschweig, 1996.

Noseck, U., Brewitz, W., Becker, D.-A., Boese, B., Buhmann, D., Fein, E., Hirsekorn, P., Kröhn, K.-P., Kühle, Th., Müller-Lyda, I. und R. Storck: Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern, GRS-153 (August 2000), Braunschweig, 2000.

Noseck, U., Brewitz, W. u.a.: Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern GRS-204 (Juli 2005), Braunschweig, 2005.

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.

Nuclear Energy Agency (NEA): Systematic Approaches to Scenario Development, Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories. OECD/NEA, Paris, 1992.

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.

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

Nuclear Energy Agency (NEA): Lessons learned from ten performance assessment studies. – Paris, 1997.

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

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

Nuclear Energy Agency (NEA): Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. Its Development and Communication. OECD, Paris, (1999).
Abrufbar unter: <http://www.nea.fr/html/rwm/reports/1999/confidence.pdf> am 24.07.2008

Nuclear Energy Agency (NEA): Regulatory Reviews of Assessments of Deep Geologic Repositories: Lessons Learnt. - OECD/NEA, Paris, 2000.

Nuclear Energy Agency (NEA): Scenario Development. Methods and Practise. An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development. - Madrid, May 1999. OECD/NEA, Paris, 2001.

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

Nuclear Energy Agency (NEA)/ Radioactive Waste Management: Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories - State-of-the-art Report. - Paris, 2003. Abrufbar unter: <http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea3615-ebs.pdf> am 24.07.2008.

Nuclear Energy Agency: Post-closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purpose. Published: NEA#03679, Paris 2004. Abrufbar unter: <http://www.nea.fr> am 24.07.2008.

Nuclear Energy Agency (NEA): The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety, Lessons Learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France; OECD, Paris, 2004.

Nuclear Energy Agency (NEA): Safety of disposal of spent fuel, HLW and long-lived ILW in Switzerland: An international peer review of the post-closure radiological safety assessment for disposal in the Opalinus Clay of the Züricher Weinland; OECD, 2004.

Nuclear Energy Agency: Joint CSNI/CNRA report on regulatory uses of safety performance. – Paris, 2006.

Nuclear Energy Agency NEA/OECD: Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?. - Symposium Proceedings Paris, France 23-25 January 2007, Paris, 2007. Abrufbar unter: <http://www.nea.fr> am 24.07.2008.

Nuclear Energy Agency (NEA): The Regulatory Goal of Assuring Nuclear Safety. – Paris 2008.

Nuclear Energy Agency (NEA): Regulating the Long-term Safety of Geological Disposal (Réglementation de la sûreté à long terme du stockage géologique). – Paris 2007(2008).

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.

Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): Sicherheitsstudien Entsorgung – Zusammenfassender Abschlussbericht. – Karlsruhe, 1983.

Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe - Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE): Aufgaben. – Abrufbar unter: <http://www.fzk.de> am 3.7.2008.

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

Reaktor-Sicherheitskommission (RSK)/Strahlenschutz-Kommission (SSK): 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.

Scheidegger, A. E.: General theory of dispersion in porous media. - J. Geophys. Res., 66 (10), 3273-3278, 1961.

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.

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

Strahlenschutzkommission (SSK): Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle – Gemeinsame Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission - verabschiedet in der 84. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 30. Juni 1988.- 1988. Abrufbar unter:
<http://www.ssk.de/werke/volltext/1988/ssk8805.pdf> am 04. 12. 2006.

Storck, R.; Hossain, S.; Podtschaske, T.; Rimkus, D.; Stelte, N.; Weber, P.: Modellsätze und Ergebnisse zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock. In: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlußbericht: Fachband 16. Hahn-Meitner Institut, Berlin 1985.

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.

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. - EUR 11778 EN, Brussels-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. - R-99-01, Stockholm, 1999.

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.

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. Abrufbar unter: <http://www.andra.fr/bioclim/publications/LasVegas.pdf> am 24.07.2008.

US Court of Appeals for the District of Columbia Circuit: Nuclear Energy Institute Inc. v. Environmental Protection Agency, No. 01-1258. – Decided July 9, 2004, Washington (DC) 2004.

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.

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

Anhang Langzeitsicherheitsnachweis

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.

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.